· U C ·

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação de um Colector Solar Incorporado numa Telha para Edificações de Baixo Custo

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Autor

Luís Pedro Vitorino Gomes

Orientadores

Professor Rui Figueiredo
Professor Sérgio Colle

Júri

Presidente	**Professora Doutora Cristina Louro da Universidade de Coimbra**
Vogais	**Professor Doutor Rui Figueiredo da Universidade de Coimbra** **Professor Doutor António Raimundo da Universidade de Coimbra**

Colaboração Institucional

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Universidade Federal de Santa Catarina

Coimbra, Setembro, 2011

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende”

Leonardo da Vinci

Para minha Mãe

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Sérgio Colle por me ter dado a oportunidade de estagiar no LABSOLAR;

Agradeço ao aluno de doutorado no LABSOLAR, José Cardemil pela sua disponibilidade e simpatia;

Agradeço a ajuda do Sr. Engenheiro Júlio Scussel sem o qual não teria sido possível a montagem do colector na bancada;

Quero agradecer a todos os meus colegas do LABSOLAR, que de certa maneira me fizeram sentir melhor recebido e me auxiliaram sempre que precisei ao longo do meu estágio;

Os meus agradecimentos ao meu orientador no DEM, o professor Rui Figueiredo;

Agradeço à Professora Cristina Louro, coordenadora da mobilidade no DEM por me ter auxiliado antes e durante o processo de intercâmbio;

Agradeço à minha Mãe e minha Irmã pela motivação que sempre me deram, assim como os conselhos que não foram em vão, sendo este documento a prova disso;

Por último, Agradeço aos meus amigos de sempre! Aos amigos da república do Bota-Abaixo pela presença constante e pelo auxílio nas alturas mais oportunas.

Resumo

O teste de colectores solares térmicos é efectuado com o objectivo de calcular a sua eficiência, para os valores da radiação solar disponível no local. A energia solar disponível é convertida para aquecer água, que circula nos tubos de fluido do colector solar.

O colector solar testado é um protótipo, onde as placas absorvedoras de radiação estão integradas no perfil de uma telha de chapa, de liga de zinco com alumínio. A telha é incluída no projecto de uma casa de baixo custo.

Os testes efectuados na bancada de ensaios estão de acordo com a norma Brasileira ABNT/CB-55, esta sendo baseada na norma europeia EN12975. A norma define a validação dos dados como a temperatura de entrada e saída de fluido do colector, por exemplo. A norma europeia define dois tipos de ensaios: em regime permanente ou SST, e em regime quase dinâmico ou QDT. Ambos os regimes são válidos para o cálculo da eficiência, no entanto o regime quase dinâmico está mais próximo do funcionamento normal do colector, e tem uma selecção de dados mais abrangente, o que faz com que seja mais utilizado.

A sequência de testes inclui um outro colector solar com eficiência média, que constitui um elemento de comparação com o protótipo.

Utiliza-se o software TRNSYS para a simulação transiente do sistema, de forma a determinar a vantagem energética proveniente da utilização da energia Solar.

Na análise económica do colector protótipo é calculado o tempo de retorno do investimento para diferentes valores da área do colector, e assim calcular vários valores do ganho económico resultante. O método utilizado na análise económica é o método LCS, ou Life Cycle Savings.

Palavras-chave: Colector Solar, Energia Solar, SST, QDT, EN12975, LCS.

Abstract

The test of solar collectors is done with the objective of determining their effectiveness, for the radiation levels available in the place. The solar energy is then converted in order to heat up the water that circulates inside the solar collector.

The collector tested is a prototype, where the absorbing plates are integrated in a steel tile, included in the project of a low cost house.

Tests are according to the Brazilian norm ABNT/CB-55, as based on the European EN 12975, controlling some of the parameters, such as the inlet and outlet fluid temperature. This norm specifies two kinds of test, one in steady state, named SST and the other in quasi dynamic state, named QDT. Both of them are valid to define the efficiency of any collector, although the QDT is more used because it's easier to accomplish and represents in a closer way, the conditions in which the collector will operate.

The sequence of tests with the prototype is compared with the tests of another collector having normal efficiency.

The software TRNSYS is used to simulate the solar system in a transient mode, in order to determine the energetic advantage from the use of the solar energy.

In the economic analyses of the prototype it's calculated the time for the return of the value of investment. For different areas of solar collector, the economic gain is calculated. The method used in this economic analysis is the LCS, or Life Cycle Savings.

Keywords Solar Collector, Solar Energy, SST, QDT, EN12975, LCS.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Colector Solar de Placa Plana (Fonte: Physics World) 5
Figura 2 - Perfil do colector solar protótipo sujeito a teste. 6
Figura 3 - Variação do comprimento da placa absorvedora com o ângulo α..................... 11
Figura 4 - Colector Solar incorporado na telha metálica instalado na Banca de Ensaios. .. 22
Figura 5 - Configuração da Bancada de Testes para um colector solar quando o fluido de transferência de calor é um líquido... 23
Figura 6 - Diagrama de Blocos do Programa de registo de dados dos Ensaios de Colectores. 25
Figura 7 - Bloco de cálculo que efectua a correcção do valor da radiação difusa devido à utilização do anel sombreador. 26
Figura 8 - Bloco de cálculo que converte a vazão volumétrica para vazão mássica........... 27
Figura 9 - Bloco de cálculo da potência medida do colector, com a dependência do calor específico pela temperatura 27
Figura 10 - Página de resultados, das perdas térmicas, calculados no programa EES........ 28
Figura 11 - Gráfico da dependência angular de FR.. 31
Figura 12 - Gráfico da Radiação Solar no dia 17 de Junho de 2011. 33
Figura 13 - Gráfico da diferença de temperaturas em função da Radiação Global............ 34
Figura 14 - Radiação Solar directa e difusa para vários ângulos de incidência. 35
Figura 15 - Gráfico da dependência entre Radiação Difusa e Radiação Global. 36
Figura 16 - Gráfico da eficiência medida e eficiência do modelo..................................... 37
Figura 17 - Curvas de eficiência instantânea para ensaios em regime quase dinâmico e em regime permanente no dia 28 de Junho de 2011. 41
Figura 18 - Colector CSP - 140V testado na Bancada do LabSolar.................................. 43
Figura 19 - Eficiências experimentais dos colectores de placa plana: Azul-Vermelho colector de eficiência média; Verde-Roxo colector integrado na telha............................. 44
Figura 20 - Comparação das eficiências normalizadas para os colectores CSP-140V e Protótipo. 45
Figura 21 - Sistema SDHW incluído nos exemplos de sistemas térmicos. Fonte: TRNSYS, exemplo SDHW... 47
Figura 22 - Perfil de Consumo de água quente doméstica. 48
Figura 23 - Análise de investimento, calculando o tempo de retorno pelo método do VLA. 52
Figura 24 - – Gráfico do LCS Solar dependente da Área de abertura............................... 53

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Expressões das variáveis e dos coeficientes utilizados na Regressão Multi Linear. 18
Tabela 2 - Valores dos Parâmetros do ensaio e desvio permitidos pelos métodos SST e QDT segundo a norma ABNT/CB-55. 19
Tabela 3 – Cálculo teórico da transmitância num vidro branco. 30
Tabela 4 – Coeficientes calculados pela regressão multi linear e suas incertezas. 38
Tabela 5 - Coeficientes do coletor calculados pela regressão mutli linear e a sua incerteza expandida. 39
Tabela 6 - Coeficientes do Colector obtidos pela regressão multi linear em regime quase dinâmico. 40
Tabela 7 - Factor de correcção da radiação solar directa. 41
Tabela 8 - Coeficientes SST do Colector obtidos pela regressão multi linear 41
Tabela 9 – Coeficientes do Colector de eficiência média 44
Tabela 10 – Comportamento energético do sistema para várias áreas de colector solar. 49
Tabela 11 – Valores do volume do reservatório simulados no período de um ano. 50
Tabela 12 – Variação da Economia do Sistema com Aquecimento Solar em Função da Área de abertura do Colector. 51
Tabela 13 – LCS Solar para várias áreas de colector 52

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

Letras Latinas

a_j – Coeficientes da regressão multi linear, onde k=1,j

AA – Área das placas absorvedoras do colector [m^2]

Aa – Área de abertura do colector [m^2]

A_C – Área genérica do colector [m^2]

Ag – Área total do colector [m^2]

b – Largura da soldadura entre os tubos e as placas de absorção [m]

b_0 – Factor de sensibilidade ao ângulo de incidência

C – Factor de correcção do anel sombreador

C_b – Condutância da soldadura entre o tubo e a placa absorvedora [W/m.K]

C_{eff} – Coeficiente da inércia térmica do sistema (k_5)

C_p – Calor específico [kJ/kg.K]

d – Taxa de Juro do empréstimo

D – Diâmetro externo dos tubos de absorção [m]

D_i – Diâmetro interno dos tubos de absorção [m]

e_p – Espessura da placa de absorção [m]

e_t – Espessura do tubo de absorção [m]

E_L – Radiação de alto comprimento de onda emitida pelo colector

F – Eficiência padrão de uma alheta

F' – Eficiência do colector (rácio entre o ganho de energia actual e o ganho de energia do colector se a placa absorvedora estivesse à temperatura local do fluido)

F_R – Factor de remoção de calor do colector solar

F_d – Fracção difusa da radiação

g – Aceleração gravitacional [m/s^{-2}]

G – Radiação global [W/m^2]

G_b – Radiação directa [W/m^2]

G_d – Radiação difusa [W/m^2]

h_c – Coeficiente de convecção dentro do colector [W/m^2.K]

$h_{c,p-c}$ – Coeficiente de convecção entre a cobertura e a placa absorvedora [W/m^2.K]

h_{fi} – Coeficiente de convecção dentro dos tubos de absorção [W/m^2.K]

$h_{r,c-a}$ – Coeficiente de radiação entre a cobertura e o ambiente [W/m^2.K]

$h_{r,p-c}$ – Coeficiente de radiação entre a placa absorvedora e a cobertura [W/m^2.K]

h_w – Coeficiente de convecção exterior originado pelo vento [W/m^2.K]

i – Períodos de tempo da análise económica (N)

k – Número de variáveis da regressão multi-linear

k_1 – Coeficiente de perdas térmicas linear

k_2 – Coeficiente de perdas térmicas quadrático

k_3 – Coeficiente de perdas por acção do vento, dependente da sua velocidade

k_4 – Coeficiente de perdas por radiação de onda longa

k_5 – Coeficiente de inércia térmica do sistema do colector

k_6 – Coeficiente da dependência da eficiência do colector pelo vento

$K_{\theta b}(\theta)$ – Factor de correcção do ângulo de incidência da radiação directa

$K_{\theta d}$ – Factor de correcção do ângulo da radiação difusa

k_c – Coeficiente de condução de calor [W/m.K]

k_b – Coeficiente de condução de calor do estanho [k_{Sn}= 66,6 W/m.K]

k_{isol} – Coeficiente de condução de calor do isolamento em EPS [W/m.K]

k_p – Coeficiente de condução de calor da placa absorvedora [W/m.K]

L – Comprimento Característico [m]

L_{isol} – Espessura do isolamento [m]

$\dot{m}$ – Caudal mássico [kg/s]

n – Número de dados utilizados na regressão multi-linear, i=1, n

N_u – Número de Nusselt

q – Potência térmica por unidade de área [W/m^2]

q'_u – Potência térmica útil por unidade de área [W/m^2]

q'_{fin} – Potência térmica da alheta por unidade de área [W/m^2]

q'_{tube} – Potência térmica do tubo de absorção por unidade de área [W/m^2]

Ra – Número de Rayleigh

s^2 – Variância dos coeficientes da regressão

S – Radiação solar absorvida pelo colector por unidade de área [W/m^2]

S_v – Factor de visibilidade do anel sombreador

t − variável do tempo [s]

T – Temperatura [K]

T_a – Temperatura ambiente [K]

T_b – Temperatura da base da placa [K]

T_c – Temperatura da cobertura [K]

T_{fi} – Temperatura do fluido à entrada do colector [K]

T_{fo} – Temperatura do fluido à saída do colector [K]

T_m – Temperatura média de fluido [K]

T_{pm} – Temperatura média da placa absorvedora [K]

ΔT – Diferença entre as temperaturas, média do fluido e ambiente [K]

$t_{\alpha/2,n-k}$ – Coeficiente t-student para um grau de significância $\alpha/2$

u – Velocidade do vento [m/s]

$u(a_j)$ – Incerteza padrão relativa ao coeficiente

$U(a_j)$ – Incerteza expandida relativa ao coeficiente

U_b – Perdas térmicas pela base do colector [W/m^{2}K]

U_e – Perdas térmicas pelos bordos do colector [W/m^{2}K]

U_L – Soma das perdas térmicas do colector [W/m^{2}K]

U_t – Perdas térmicas pelo topo do colector [W/m^{2}K]

V – Ângulo de obstrução do anel de sombreamento a partir do centro do domo do piranómetro

W – Largura total da placa absorvedora [m]

Letras Gregas

α – Ângulo de soldadura entre o tubo de absorção e a placa plana [°]

α_p − Absortância da placa absorvedora

α_{dT} – Difusividade térmica do fluido

β – Ângulo de inclinação da superfície do colector [°]

γ – Espessura da soldadura entre o tubo e a placa absorvedora [m]

δ − Ângulo de declinação solar [°]

ε_c − Emitância da cobertura

ε_i − Erro entre o valor da medição e o valor do modelo de regressão linear

ε_p − Emitância da placa

η − Eficiência energética

η_0 − Eficiência energética sem perdas térmicas

$\eta_{0,norm}$ − Eficiência energética sem perdas térmicas

η_{norm} − Eficiência energética normalizada ($G = 800\ W/m^2$)

η_{med} − Eficiência energética medida

η_{mod} − Eficiência energética do modelo

θ − Ângulo de incidência do Sol sobre o colector

λ − Comprimento de onda da radiação [μm]

ν − Viscosidade cinemática [m^2/s]

σ − Constante de Stefan-Boltzmann, igual a 5,67 x 10^{-8} [$W/m.K^4$]

τ − Transmitância do vidro da cobertura

ϕ − Latitude [°]

ω_s − Ângulo do nascer do Sol

Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers

CF – Cash Flow

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EES – Engineering Equation Solver

EPS – Expanded Polystyrene

ETS – Evacuated Tube Solar

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar Térmica da UFSC

LCC – Life Cycle Cost

LCS – Life Cycle Savings

MLR – Multi Linear Regression

QDT – Quasi Dynamic Test

SDHW – Solar Domestic Hot Water

SST – Steady State Test

SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment

TMY – Typical Meteorological Year

TRNSYS – Transient System Simulation Program

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

VLA – Valor Líquido Actual

Índice

Índice de Figuras iv
índice de Tabelas v
Simbologia e Siglas vi
Simbologia vi
Siglas ix
1. Introdução 1
2. Colectores Solares planos 4
2.1. Colector Solar em Estudo 5
2.2. Especificações Gerais do Painel 6
2.3. Perdas Térmicas 8
2.4. Factor de eficiência do colector 10
3. Ensaios de Colectores 13
3.1. Ensaio em regime permanente 14
3.2. Ensaio em regime quasi-dinâmico 15
3.3. Período de Teste 20
3.4. Curvas de Eficiência Normalizada 21
4. Material e métodos 22
4.1. Bancada de Ensaios 22
4.2. Programa de aquisição de dados 24
4.3. Cálculos Teóricos 28
5. Resultados E discussão 33
5.1. Ensaio em regime Permanente 40
5.2. Eficiência energética do colector dependendo da área 42
5.3. Comparação do colector protótipo com um colector de eficiência média 43
5.4. Modelação Transiente do Colector Solar 47
5.5. Análise Económica do Colector Solar 50
6. Conclusões 54
7. Referências Bibliográficas 56
ANEXO 1 58
ANEXO 2 61
ANEXO 3 72

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia na prática da Engenharia, a Energia Solar Térmica encontra-se bem representada por modelos e soluções, para todos os níveis da sociedade, quer seja para o aquecimento de água de banhos, ou o aquecimento do ambiente interior de uma habitação, a energia solar tem de estar presente. Se não como fonte primária, em série com uma fonte de aquecimento auxiliar, pelo menos para que os custos da energia obtida do exterior possam baixar substancialmente.

No caso de habitações de baixo custo, o objectivo é reduzir os gastos energéticos com os chuveiros eléctricos, equipamento muito utilizado no Brasil apresentando uma solução simples, mas que tem associado um dispêndio de energia elevado, assim como é responsável pelas quebras de fornecimento ao atingirem-se máximos de consumo não comportáveis pelo sistema, como é discutido no artigo **Uma Análise de Sistemas de Aquecimento Solar de Água para uso Doméstico no Brasil**, desenvolvido pelo meu orientador, o professor Sérgio Colle no laboratório de energia solar da UFSC.

A minha Tese de Mestrado é o resultado de um interesse pelas energias renováveis, assim como pelas melhores formas de utilizar os recursos presentes no ambiente e de acesso facilitado. A Energia Solar Térmica, assim como o teste de colectores solares segundo as normas em vigor são os temas em desenvolvimento, conforme foi estudado no artigo "**Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2**", redigido por FISCHER e a determinação das incertezas, assim como as instruções de operação da bancada forma desenvolvidas pelo aluno de doutoramento Manfred Kratzenberg, na sua dissertação de mestrado "**Método para Avaliação de Incertezas de Ensaios de Colectores Solares Baseados nas Normas EN12975 e ISO9806**"

As conclusões obtidas são fundamentadas pela comparação entre dois colectores solares testados na bancada de ensaios do LABSOLAR. Os colectores propostos a teste foram ambos fabricados no estado de Santa Catarina, com diferentes configurações, assim obtendo resultados necessariamente diferentes.

Colectores solares de placa plana são normalmente montados como caixas metálicas sobre o telhado das habitações, e do lado onde incide a irradiação, a caixa é coberta por um vidro que ajuda a criar um espaço com ar, diminuindo as perdas térmicas do colector pelo topo, assim como as perdas por radiação devido às reflexões provenientes das placas absorvedoras. Por fim a energia solar absorvida pelas placas é transmitida para o fluido que passa nos tubos do colector, sendo armazenado no reservatório de água quente.

O estudo energético de um colector solar protótipo que, ao invés de ter as placas absorvedoras confinadas numa caixa metálica, estas são incorporadas no perfil de uma telha de chapa galvanizada, é o objectivo. O perfil da telha permite que seja colado um vidro de fina espessura por cima da telha, tapando os elementos absorvedores com o objectivo de reduzir as perdas térmicas como em qualquer colector plano normal.

Os testes foram todos efectuados no exterior (local onde está a bancada), no entanto variam as formas de interpretação dos resultados, podendo ser efectuados ensaios em regime permanente (Steady State Test) e ensaios em regime quasi-dinâmico (Quasi-Dynamic Test). As normas ISO9806-1, ISO9806-3, e a ASHRAE 93-77 certificam os testes em regime permanente, já a EN12975 certifica os testes quasi dinâmicos. A norma utilizada foi a ABNT/CB-55, que introduz no Brasil as normas de ensaios de colectores solares.

Os ensaios SST, ou de regime permanente, são normalmente efectuados com irradiação artificial, o que eleva o seu custo. Podendo também ser efectuados no exterior, mas com algumas condições que exigem uma elevada irradiação solar, e com ângulos de incidência em torno da orientação normal, restringindo assim o número de medições válidas e não raras vezes aumentando o número de dias de registo de dados. A vantagem de um ensaio QDT, ou de regime quasi-dinâmico, é o baixo custo de teste, visto a fonte de radiação ser o Sol e apenas ser efectuado no exterior. Nestes ensaios representa-se com maior semelhança as condições reais de funcionamento do sistema solar, onde são medidas mais variáveis, tornando o modelo mais completo, como por exemplo com a integração do termo da radiação difusa.

O plano de trabalho sugerido pelo meu orientador na UFSC é apresentado no ANEXO 1. Neste é sugerido o cálculo das propriedades ópticas do colector, que são

a transmitância do vidro e a capacidade da placa absorver radiação solar, designada por absortância.

O colector solar não é estudado completamente sem que seja efectuada uma modelação em regime transiente. O Software utilizado é o TRNSYS, e aplicado um exemplo de um sistema solar de aquecimento de águas domésticas, onde o colector solar tem as características do colector protótipo. O objectivo principal dos ensaios do colector é a determinação da sua viabilidade económica, onde é analisado o investimento para um período de vários anos utilizando o método LCS, ou Life Cycle Savings, proposto por Duffie & Beckmann (2006).

A parte final do estudo inclui as impressões sobre o colector solar protótipo, e as melhorias possíveis do projecto. Pois como a necessidade de água quente doméstica, para a casa de baixo custo, não irá acabar. O aquecimento de água pelo sol mantém-se uma solução válida para diminuir os custos com a energia eléctrica.

2. COLECTORES SOLARES PLANOS

Um dos componentes de um colector plano é a caixa metálica, que protege as placas absorvedoras do exterior. Nessa caixa, isolada termicamente pelos lados e pela parte inferior, é acoplado um vidro no topo para permitir a passagem da radiação solar. O vidro, que deve ter boa transparência para que as placas absorvedoras recebam a maior quantidade possível de radiação, ajuda a reflectir internamente a radiação criando assim uma acumulação de calor no interior do colector. Ao mesmo tempo, o vidro evita que as perdas por convecção, devido ao vento, se tornem elevadas.

O objectivo do colector solar é a absorção, com a maior eficiência possível, da radiação solar. Uma vez absorvido, o calor proveniente da radiação é transmitido para o fluido que circula na tubulação interna do colector. O fluido que sai do colector vai até um reservatório isolado termicamente, onde é armazenado para posterior utilização doméstica.

Os casos de baixo rendimento do colector devem-se, entre outros factores, à opacidade da cobertura, falta de contacto térmico entre a superfície de absorção e as tubulações, e um isolamento térmico insuficiente entre o elemento absorvedor e o ambiente.

O absorvedor necessita apresentar algumas condições para que o colector seja considerado de boa eficiência térmica, esses factores são:

- O material usado nos tubos e nas placas absorvedoras, assim como o material de solda devem ser de alta condutibilidade térmica;
- A resistência de contato entre a placa absorvedora e o tubo deve ser minimizada;
- O elemento absorvedor deve ter comportamento seletivo, ou seja, deve apresentar alta absortância e baixa emissividade.

O colector testado na bancada do LABSOLAR é comparado a um outro colector plano com eficiência média construído pelo mesmo fabricante. Em colectores

planos, o nível de perdas térmicas é maior do que em outros coletores, como os de tubos de vácuo, ou ETS. No entanto estes colectores são mais versáteis e podem ser utilizados numa ampla faixa de condições climáticas, pois é possível adicionar anti-congelante e dessa forma o colector ser usado a baixas temperaturas. Mesmo não sendo os colectores mais eficientes, os colectores planos possuem uma durabilidade de 25 anos, portanto apresentam a melhor relação de custo-benefício nos sistemas de aquecimento solar.

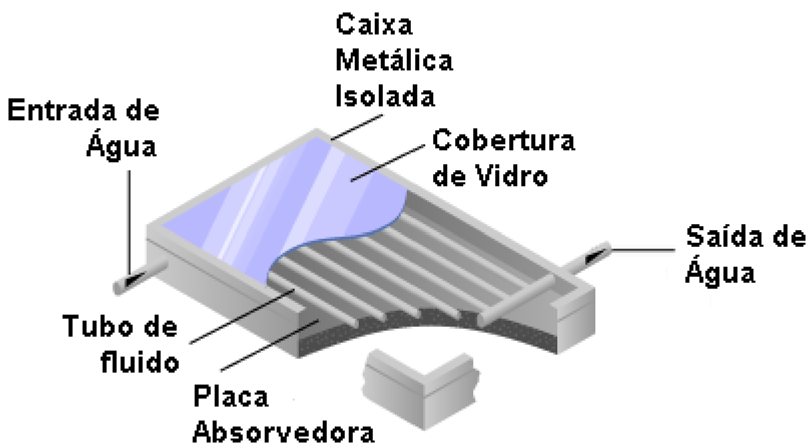


Figura 1 - Colector Solar de Placa Plana (Fonte: Physics World)

2.1. Colector Solar em Estudo

O objectivo da construção do colector apresentado no presente trabalho é a incorporação do mesmo em casas pré-fabricadas para consumidores de baixa renda, conforme é apresentado o projecto no ANEXO 2. A intenção é de introduzir as placas absorvedoras no perfil de uma telha metálica e cobrir o conjunto com uma cobertura de vidro.

A eficiência do colector pode ser baixa, no entanto há uma disponibilidade de área bastante grande e como os custos de construção não incluem a caixa metálica de

suporte às placas absorvedoras, o custo final é reduzido. A figura 2 ilustra como as placas foram acopladas à telha da casa:

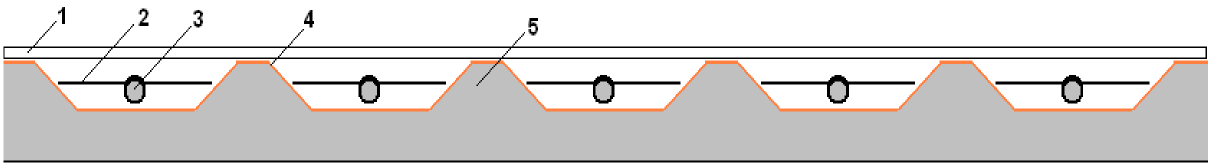


Figura 2 - Perfil do colector solar protótipo sujeito a teste. Legenda: (1) – Cobertura de Vidro; (2) – Placa Absorvedora; (3) – Tubo absorvedor de calor; (4) – Telha Metálica; (5) – Isolamento Térmico (EPS).

O perfil da telha permite que as placas absorvedoras sejam colocadas em espaços individualizados. Assim há uma parte da área do colector que não é utilizada para absorver radiação, o que faz reduzir o nível de eficiência quando comparado com outros colectores de placa plana, onde as placas absorvedoras têm uma distribuição contínua. Ocupando pouco mais de 60% da área de abertura da telha, as placas absorvedoras vão fornecer menos calor ao fluido, sendo de esperar que a eficiência do colector seja menor que a de um colector de eficiência média ($\eta \cong 0{,}7$).

2.2. Especificações Gerais do Painel

1. **Fabricante** Solares,
   Estado de Santa Catarina, Brasil
   Protótipo construído em 2011

2. **Dimensõess do Coletor**
   Área Total : 1,63 m^2
   Área de Abertura: 1,265 m^2
   Área do Absorvedor: 0,795 m^2

3. **Geometria** Colector Solar Plano
   Comprimento: 1240 mm

Largura: 1020 mm

Altura: 68 mm

Material da telha: Chapa Galvalume

Isolamento estrutural da telha: Espuma de Poliestireno Expandido

4. **Absorvedor**

Material: Cobre

Espessura: 0,2 mm

Tratamento de superfície: Superfície Pintada com Prímer Vinílico preto Fosco Glasurit/Basf

Absortância: 0,95

Emitância: 0,86

Padrão de Escoamento: Paralelo

Dimensões dos tubos de absorção: 15mm × 0,4mm ($D_{ext}\times e_t$)

Número de Tubos de Absorção: 5

Dimensões do Tubo de Topo: em cobre 28mm × 0.4mm ($D_{ext}\times e_t$)

5. **Cobertura Transparente**

Número: 1

Material: Vidro Branco

Espessura: 3 mm

Fixação à Telha: Silicone

6. **Isolamento**

Material: Lã mineral para o Tubo de Topo; Poliestireno expandido na estrutura da telha

Densidade:	20 kg/m^3	-
Espessura:	20 mm	50 mm

7. **Limitações**

Temperatura de Estagnação (°C): 160 °C

Pressão máxima admissível de operação: 4 bar

2.3. Perdas Térmicas

As perdas térmicas introduzidas na equação pelo elemento U_L são calculadas, a partir da temperatura média da placa, como segue

$$U_L = U_t + U_b + U_e \qquad [\mathrm{W/m^2K}] \qquad (1)$$

onde U_t é o coeficiente de perdas térmicas pelo topo, U_b o coeficiente de perdas pela parte inferior do colector e U_e as perdas pelos lados do colector:

$$U_t = \left(\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}}\right)^{-1} \qquad (2)$$

$$U_b = \frac{k_{isol}}{L_{isol}} \qquad (3)$$

$$U_e = \frac{(k_{isol}/espessura) \times Perimetro \times altura\ do\ coletor}{Ag} \qquad (4)$$

O cálculo de U_t pode ser realizado a partir da equação apresentada por Duffie & Beckman no Livro "Solar Engineering of Thermal Processes" (2006, pp. 253), mas o seu cálculo torna-se muito complexo portanto escolheu-se utilizar o software EES (Academic Professional V8.640) com equações mais simples. A finalidade deste cálculo teórico é a posterior comparação com os dados obtidos nos ensaios. As equações introduzidas no software foram:

$$q = U_t(T_{pm} - T_a) \qquad (5)$$

$$q = h_c\left(T_{pm} - T_c\right) + \frac{\sigma\left({T_{pm}}^4 - {T_c}^4\right)}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_c - 1} \tag{6}$$

$$q = h_w(T_c - T_a) + \sigma\varepsilon_c\left({T_c}^4 - {T_a}^2\right) \tag{7}$$

Onde, o índice ***p*** é referente à placa absorvedora; o índice ***c*** à cobertura; o ***w*** ao vento e o índice ***a*** ao ambiente. O EES efectua um cálculo iterativo, e necessita de duas equações que calculam o número de Nusselt (Nu) e uma outra para o número de Rayleigh (Ra):

$$Ra = \frac{g\left(T_{pm} - T_c\right)L^3}{T_m.\nu\alpha} \tag{8}$$

$$Nu = 1 + 1{,}44\left[1 - \frac{1708(sin1{,}8\beta)^{1{,}6}}{Ra.cos\beta}\right]\left[1 - \frac{1708}{Ra.cos\beta}\right]^+ + \left[\left(\frac{Ra.cos\beta}{5830}\right)^{1/3} - 1\right]^+ \tag{9}$$

$$Nu = \frac{h_c L}{k} \tag{10}$$

O resultado do método iterativo será o termo das perdas pelo topo do colector U_t. No entanto foi adicionada mais uma equação, com o intuito de definir a temperatura média do fluido, e assim podendo ignorar a temperatura média da placa, o que resulta numa simplificação do cálculo das perdas térmicas. A equação seguinte considera as trocas por convecção no interior da tubagem, assim como a condutância da ligação soldada entre a placa e o tubo:

$$q'_u = \frac{T_b - T_f}{\frac{1}{h_{fi}\pi D_i} + \frac{1}{C_b}} \tag{11}$$

Com a condutância da soldadura, definida por

$$C_b = \frac{k_b . b}{\gamma} \tag{12}$$

2.4. Factor de eficiência do colector

Os elementos absorvedores de radiação num colector podem ser divididos entre tubos e placas. O comportamento térmico de uma placa pode ser estudado como uma alheta (Duffie, Beckman 2006). O perfil de temperaturas pode ser considerado igual ao longo do seu comprimento,

$$q'_{fin} = (W - D.sen(\alpha))F[S - U_L(T_b - T_a)] \tag{13}$$

Onde, W é a largura da placa, ou seja, comprimento da alheta. D representa o diâmetro do tubo absorvedor de calor. O termo do diâmetro tem acoplado uma função trigonométrica que considera a redução do comprimento de placa absorvedora. O objectivo é aumentar a área de contacto da placa com o tubo para reduzir o nível de perdas térmicas.

A figura 3 mostra como é calculada a redução do comprimento da alheta pela variação do ângulo α:

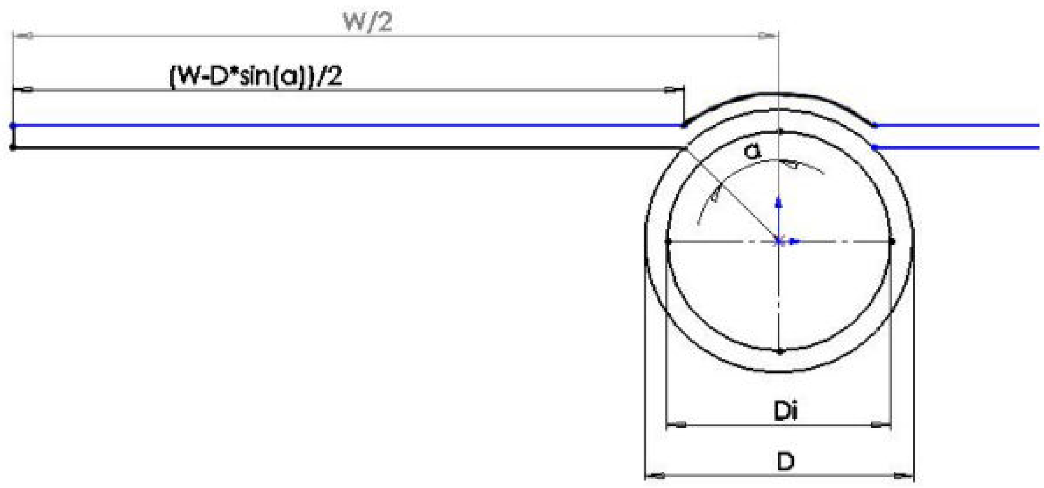


Figura 3 - Variação do comprimento da placa absorvedora com o ângulo α. Fonte: Exercícios de Energia Solar, Colle.

O termo F expressa a eficiência padrão da alheta,

$$F = \frac{tanh[m(W - D.sen(\alpha))/2]}{m(W - D.sen(\alpha))/2} \tag{14}$$

Com o termo m sendo o resultado de

$$m = \sqrt{U_L/k_p.e_p}$$

O ganho energético do tubo é expresso como segue,

$$q'_{tube} = D[S - U_L(T_b - T_a)] \tag{15}$$

Resultando,

$$q'_u = \big((W - D.sen(\alpha))F + D\big)[S - U_L(T_b - T_a)] \tag{16}$$

Na última etapa o ganho energético deve ser transferido para o fluido, onde são contabilizadas as resistências do fluido para o tubo e do tubo para a soldadura, conforme descrito pelas expressões (35) e (36).

Substituindo a temperatura da placa absorvedora, e impondo os limites de temperatura, do ambiente e do fluido, o ganho energético é

$$q'_u = W.F'\left[S - U_L\left(T_f - T_a\right)\right] \tag{17}$$

Onde,

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W\left[\frac{1}{U_L[D.sen(\alpha) + (W - D.sen(\alpha))F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}}\right]} \tag{18}$$

O factor empregue para determinar a eficiência da remoção de calor do colector é o seguinte,

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p\left(T_{fo} - T_{fi}\right)}{A_c\left[S - U_L\left(T_{fi} - T_a\right)\right]} \tag{19}$$

Esse factor relaciona o ganho útil actual de energia com o ganho útil de energia se toda superfície do colector estivesse à temperatura de entrada do fluido, que é o máximo possível de ganho energético, pois as perdas térmicas para a vizinhança seriam mínimas. O ganho útil de energia define-se como segue,

$$Q_u = A_c F_R[S - U_L(T_i - T_a)] \tag{20}$$

3. ENSAIOS DE COLECTORES

A publicação da Norma EN12975 estabeleceu uma orientação única nos procedimentos de teste de colectores solares na Europa. Antes desta existiam as normas ISO9806 e a ASHRAE 93-77 para ensaios em regime permanente. A norma europeia permitiu a uniformização das bancadas de teste para ensaios em regime quasi-dinâmico. Este teste permite uma maior gama de condições climatéricas, podendo também ser comparado com o teste em regime permanente.

A definição da eficiência medida (η_{med}) é o quociente entre, a energia solar disponível e o ganho energético transportado pelo fluido traduzido pelo diferêncial de temperatura entre a entrada e a saída do colector, conforme segue:

$$\eta_{med} = \frac{\dot{m}C_p\left(T_{fo} - T_{fi}\right)}{A_c \times G} \qquad (21)$$

Na bancada de ensaios podem ser realizados ensaios em regime permanente (SST) e regime quasi-dinâmico (QDT). Os transdutores que registam as condições de radiação solar e ambientais da bancada, permitem que seja feito um balanço energético do colector relacionando-o com o sítio onde está instalado. Assim contabilizando as perdas e ganhos energéticos podemos obter valores de eficiência do colector e simular o seu comportamento para períodos de tempo mais longos que os dos ensaios.

O TMY é um conjunto de dados meteorológicos registados por estações de medida, num local definido e para um período de tempo superior a um ano, normalmente de 30 anos. Neste banco de dados são definidos os valores típicos anuais, não sendo aplicáveis para prever o comportamento mais desfavorável dos sistemas, mas sim para prever médias de radiação anuais que se enquadram nas médias de longo termo do local em estudo. O objectivo é a simulação de sistemas de conversão de energia solar, e os valores foram extraídos da base de dados SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), pelo engenheiro investigador do LABSOLAR, Luigi Passos.

3.1. Ensaio em regime permanente

O regime de teste mais dispendioso e mais restrito em termos de possibilidade de validação de valores de ensaio é o de regime permanente. Este pode ser efectuado com radiação solar simulada, em bancada de ensaios interior, ou com radiação Solar numa bancada no exterior. A bancada de ensaios do LABSOLAR é exterior, e como tal apenas permite a realização de ensaios no exterior.

Se normalmente os limites da radiação Solar variam entre 0 e 1100 W/m^2 este ensaio utiliza menos de metade da faixa de radiação possível, validando apenas valores de radiação superiores a 700 W/m^2. Para ensaios no exterior, o tempo durante o qual se podem registar dados é reduzido, pois é necessária uma altura solar elevada, ou seja, a hora deverá ser próxima do meio-dia para a irradiação máxima, contando com desvios mínimos entre a radiação solar directa e a normal à superfície do colector. A expressão do modelo apresenta-se da seguinte forma:

$$\eta_{mod} = \eta_0 . 1 - k_1 \frac{\Delta T}{G} - k_2 \frac{\Delta T^2}{G} \tag{22}$$

Onde,

- $\eta_0 -$ representa a eficiência do coletor para uma irradiação normal, sem perdas térmicas,
- $k_1 -$ o coeficiente de perdas térmicas linear,
- $k_2 -$ o coeficiente de perdas térmicas quadrático, e
- ΔT, a diferença de temperatura entre a temperatura média do fluido, $T_m = \frac{T_{out} - T_{in}}{2}$ e a temperatura ambiente T_a ,então $\Delta T = T_m - T_a$ $[K]$.

O ensaio em regime permanente não possui um factor de correcção do ângulo de incidência para a radiação difusa, porque esta toma o valor zero devido a toda a radiação ser interpretada como radiação directa.

Alguns limites para a validação de dados, comuns a ambos os métodos de ensaio, são impostos pela Norma ABNT/CB-55:

- A condição para o ângulo de incidência é satisfeita se o ângulo de incidência da radiação directa na abertura do coletor for menor que 20°;
- Imposto o limite máximo de radiação difusa em 30% da radiação global, ou seja, $F_d<0,3$, onde F_d é a fração difusa, $F_d = \frac{G_d}{G}$;
- O vento, controlado artificialmente sobre o plano da cobertura, através de um ventilador deve ser 3±1[m/s];
- O caudal do fluido deve ser fixa e igual a 0,02 kg/s por metro quadrado de área do coletor. O valor ajustado durante cada periodo de ensaio deve ser mantido estável com variações menores a ±1% além disso o caudal não deve variar mais de ±10% do valor ajustado de um periodo de ensaio para outro (ABNT/CB-55, Março 2009).

3.2. Ensaio em regime quasi-dinâmico

Neste regime de ensaio consideram-se as duas componentes da radiação solar: Directa (G_b) e Difusa (G_d). Desta forma leva-se em conta um maior número de situações além da validação de um maior número de dados. Este método permite testar o colector sob condições próximas às condições reais de operação, onde a expressão completa do modelo inclui agora um termo para a radiação difusa (G_d). Esse termo tem acoplado o factor de correcção do ângulo de incidência ($K_{\theta d}$,) para radiação difusa, assim como a eficiência do colector sem perdas térmicas (η_0).

A influência do vento nas perdas energéticas também é considerada neste método. Dois termos são introduzidos: O primeiro expressa a influência do vento sobre a eficiência do colector sem perdas ($-k_6u$); o segundo termo define o valor das perdas de calor devido ao vento ($-k_3u(T_m-T_a)$). A influência das trocas por convecção do colector com o vento são mais pronunciadas nos colectores sem cobertura, ou colectores para aquecimento de piscinas.

No colector sem cobertura aparecem também trocas por onda longa que não devem ser ignoradas, introduzidas pelo termo ($k_4(E_L-\sigma T_a^4)$) e tratadas como uma perda do sistema.

A expressão do modelo completo, para uma vasta gama de colectores solares é a seguinte,

$$\eta_{mod} = \eta_0 K_{\theta b}(\theta)\frac{G_b}{G} + \eta_0 K_{\theta d}\frac{G_d}{G} - k_6 u - k_1\frac{\Delta T}{\mathrm{G}} - k_2\frac{\Delta T^2}{G} - k_3 u\frac{\Delta T}{\mathrm{G}} + k_4\left(E_L - \sigma {T_a}^4\right).\frac{1}{G} - k_5\frac{dT_m}{dt}.\frac{1}{G} \quad (23)$$

Os coeficientes a calcular são os seguintes:

- η_0 – Eficiência do coletor para uma irradiação normal, sem perdas térmicas;
- k_1 – coeficiente de perdas térmicas linear;
- k_2 – coeficiente de perda térmicas quadrático;
- k_3 – coeficiente de perdas por acção do vento, dependente da sua velocidade;
- k_4 – coeficiente de perdas por radiação de onda longa;
- k_5 – capacitância térmica efetiva;
- k_6 – dependência de η_0 pelo vento;
- $K_{\theta b}(\theta)$ – Fator de correcção do ângulo de incidência da radiação direta;
- $K_{\theta d}$ – Fator de correcção do ângulo de incidência da radiação difusa.

A dependência do ângulo de incidência é calculada pela expressão

$$K_{\theta b}(\theta) = 1 - b_0\left(\frac{1}{cos\theta} - 1\right) = \frac{\tau\alpha_p}{\left(\tau\alpha_p\right)_n} \quad (24)$$

Onde b_0 corresponde ao factor de sensibilidade para a função $\left(\frac{1}{cos\theta} - 1\right)$

Os coeficientes considerados obrigatórios para todos os colectores são apenas η_0, $K_{\theta b}(\theta)$, $K_{\theta d}$, k_1, k_2 e k_5. Assim o modelo a ser utilizado nos testes, para colectores planos, com cobertura de vidro é o seguinte:

$$\eta_{mod} = \eta_0 K_{\theta b}(\theta)\frac{G_b}{G} + \eta_0 K_{\theta d}\frac{G_d}{G} - k_1\frac{\Delta T}{\mathrm{G}} - k_2\frac{\Delta T^2}{G} - k_5\frac{dT_m}{dt}.\frac{1}{G} \quad (25)$$

Substituindo $K_{\theta b}(\theta)$ pela expressão da equação (49), vem

$$\eta_{mod} = \eta_0\frac{G_b}{G} - \eta_0 b_0\left(\frac{1}{cos\theta} - 1\right)\frac{G_b}{G} + \eta_0 K_{\theta d}\frac{G_d}{G} - k_1\frac{\Delta T}{\mathrm{G}} - k_2\frac{\Delta T^2}{G} - k_5\frac{dT_m}{dt}.\frac{1}{G} \quad (26)$$

O cálculo dos coeficientes do modelo, e dos factores de correcção da radiação directa e difusa, assim como o termo da eficiência sem perdas térmicas é feito através da aplicação da regressão multi linear. Esta metodologia consiste num método matricial directo, disponível em programas com funções estatísticas, como o Excel™. O termo linear significa que o modelo tem que ser escrito como uma soma das variáveis (fornecidas pelos transdutores e que podem tomar valores fortemente não lineares), com os coeficientes e as constantes a determinar, pela seguinte expressão:

$$Q_{med,i} = Y_i + \varepsilon_i = a_0 + a_1X_{1,i} + a_2X_{2,i} + a_3X_{3,i} + \ldots + a_jX_{j,i} + \varepsilon_i \ , \qquad i = 1, n \quad (27)$$

O termo $\mathbf{a_0}$ representa a intersecção com o eixo vertical, enquanto os coeficientes são os termos de $\mathbf{a_1}$ a $\mathbf{a_n}$. As variáveis de regressão são representadas pelos termos $\mathbf{X_{1,i}}$ a $\mathbf{X_{n,i}}$ **,** e $\boldsymbol{\varepsilon_i}$ é a diferença entre o valor medido e o valor do modelo, que resume as incertezas do modelo e incertezas de medição. No modelo utilizado pela norma EN12795 não é considerada a intersecção da curva de eficiência com o eixo Y, dessa forma o coeficiente $\boldsymbol{\alpha_0}$ deixa de estar presente e a equação para a MLR (multi linear regression) fica expressa da seguinte forma:

$$Q_{med,i} = a_1X_{1,i} + a_2X_{2,i} + a_3X_{3,i} + \ldots + a_jX_{j,i} + \varepsilon_i \ , \qquad i = 1, n \quad (28)$$

Sintetizando a expressão:

$$Q_{med,i} = Q_{mod,i} + \varepsilon_i = \sum_{j=1}^{k} a_j X_{j,i} + \varepsilon_i \tag{29}$$

O método MLR permite uma selecção completamente livre dos valores da base de dados do ensaio, de acordo com as especificações de ensaio, antes mesmo de aplicar a identificação de parâmetros MLR (ABNT/CB-55).

As variáveis e coeficientes são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Expressões das variáveis e dos coeficientes utilizados na Regressão Multi Linear.

Variável	Coeficiente
$\boldsymbol{X_1 = \frac{G_b}{G}}$	$a_1 = \eta_0$
$\boldsymbol{X_2 = \frac{G_b}{G}\left(\frac{1}{cos\theta} - 1\right)}$	$a_2 = \eta_0 \times b_0$
$\boldsymbol{X_3 = \frac{G_d}{G}}$	$a_3 = \eta_0 \times K_{\theta d}$
$\boldsymbol{X_4 = \frac{\Delta T}{G}}$	$a_4 = k_1$
$\boldsymbol{X_5 = \frac{\Delta T^2}{G}}$	$a_5 = k_2$
$\boldsymbol{X_6 = \frac{\partial T_m}{\partial t}\frac{1}{G}}$	$a_6 = k_5$

O termo resultante da diferença entre medição e modelo é o erro. Este termo é utilizado no cálculo das incertezas e define-se na expressão seguinte:

$$error_i^{\,2} = \varepsilon_i^{\,2} = \left(\eta_{med,i} - \eta_{mod,i}\right)^2 = \left(\eta_{med,i} - \sum_{j=1}^{k} (X_{j,i} . a_j)\right)^2 \tag{30}$$

Assumem-se como coeficientes para a curva de rendimento do colector, aqueles que minimizam o erro quadrático:

$$\sum_{i=1}^{k}\left(\eta_{med,i}-\sum_{j=1}^{k}(X_{j,i}.a_j)\right)^2 \rightarrow min \tag{31}$$

Tabela 2 - Valores dos Parâmetros do ensaio e desvio permitidos pelos métodos SST e QDT segundo a norma ABNT/CB-55.

Parâmetro	Regime Permanente		Regime Quasi-Dinâmico	
	Valor	Desvio	Valor	Desvio
Radiação Global (W/m²)	>700	±50	300<G<1100	±50
Ângulo de Incidência θ (°)	<20	-	-	-
Fração Difusa G_d/G	<0,3	-	-	-
Temp. Ambiente T_a [K]	-	±1,5	-	±1,5
Veloc. Do Vento u [m/s]	3	±1	3	±1
Temp. De entrada T_{in} [K]	-	±0,1	-	±1
Caudal Mássico do Fluido [kg/m²s]	0,02	±1%	0,02	±1%
T_{out}-T_{in} [K]	>1	-	>1	-
dTm/dt [K/s]	-	±0,005		
Intervalo de medição dt [s]	6	±0,1	6	±0,1

Uma temperatura de entrada deve ser seleccionada de forma que a temperatura média do fluido seja ±3K da temperatura do ar ambiente, próximo do meio-dia solar, para obter uma determinação precisa de η_0 (ABNT/CB-55, 2009).

A diferença entre as temperaturas média e ambiente tem de ser positiva, ΔT>0, a fim de evitar erros gerados pela mudança, na direcção do fluxo de calor entre o sistema e a vizinhança.

3.3. Período de Teste

Os dados obtidos a partir dos ensaios realizados devem conter a informação necessária para a identificação dos coeficientes do colector definidos no modelo anterior. A validação dos dados para ambos os métodos é basicamente a mesma, apenas variando a potência de radiação, o ângulo de incidência e a fracção difusa, assim como a tolerância para as medições da temperatura do fluido à entrada do colector. Por isto o tempo necessário para que se possam obter dados para os dois métodos de ensaios é diferente. Sendo precisos de quatro a cinco dias no ensaio QDT, pois é necessário testar o colector para várias temperaturas, totalizando 4 temperaturas de entrada do fluido espaçadas sobre o intervalo de temperatura de operação do colector: T=Ta; T=Ta+20; T=Ta+40; T=Ta+60. Se o fluido de transferência de calor é a água, a temperatura máxima deve estar pelo menos por volta de 80 ^{0}C (ABNT/CB-55). O ensaio SST necessitará de mais dias pois o valor necessário da radiação solar para validar os dados é superior ao do QDT e as condições do céu serão mais próximas das de céu limpo, com o horário onde são validados os dados próximo do meio-dia solar.

As medições durante um dia completo permitem obter informações sobre o factor de correcção do ângulo de incidência, para que a partir do ensaio QDT se consiga identificar a dependência da radiação difusa.

A capacitância térmica do colector solar determina o seu desempenho transiente, mas para conseguir essa medição necessita-se de uma grande variação da temperatura média num período de tempo reduzido. Como a temperatura à entrada do colector é fixa para testes de acordo com a norma ABNT/CB-55, a irradiação solar terá de variar bastante de forma a alterar o valor de dT_m/dt , e para conseguir essa variação, um céu parcialmente nublado é desejável.

3.4. Curvas de Eficiência Normalizada

A comparação entre ambos os métodos de ensaios de colectores é efectuada mediante a normalização da curva de eficiência do ensaio QDT. Pois o ensaio em regime quasi dinâmico pode conter maior instabilidade, na curva de eficiência que o SST.

A norma ABNT/CB-55 define que as curvas normalizadas de eficiência devem ter as seguintes condições:

- Radiação Global: 800 W/m^2;
- Radiação Directa: 680 W/m^2 (com 85% da radiação global);
- Radiação Difusa: 120 W/m^2 (15% da radiação global);
- Ângulo de incidência: 15°.

A eficiência normalizada define-se pelas seguintes expressões:

$$\eta_{norm} = \eta_{0,norm} - k_1 \frac{T_m - T_a}{G} - k_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \tag{32}$$

Onde,

$$\eta_{0,norm} = \eta_0 \left(\frac{G_b}{G} K_{\theta b}(15^0) + \frac{G_d}{G} K_{\theta d} \right) \tag{33}$$

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Bancada de Ensaios

A bancada de testes, do LabSolar está localizada em Florianópolis, no topo do edifício do Bloco A3 da Engenharia Mecânica, com as coordenadas **S** 27°60' para a Latitude e **W** 48°31'4,2'' de Longitude.

A bancada de ensaios, com a montagem para o teste do coletor integrado na telha é apresentada na figura 4:

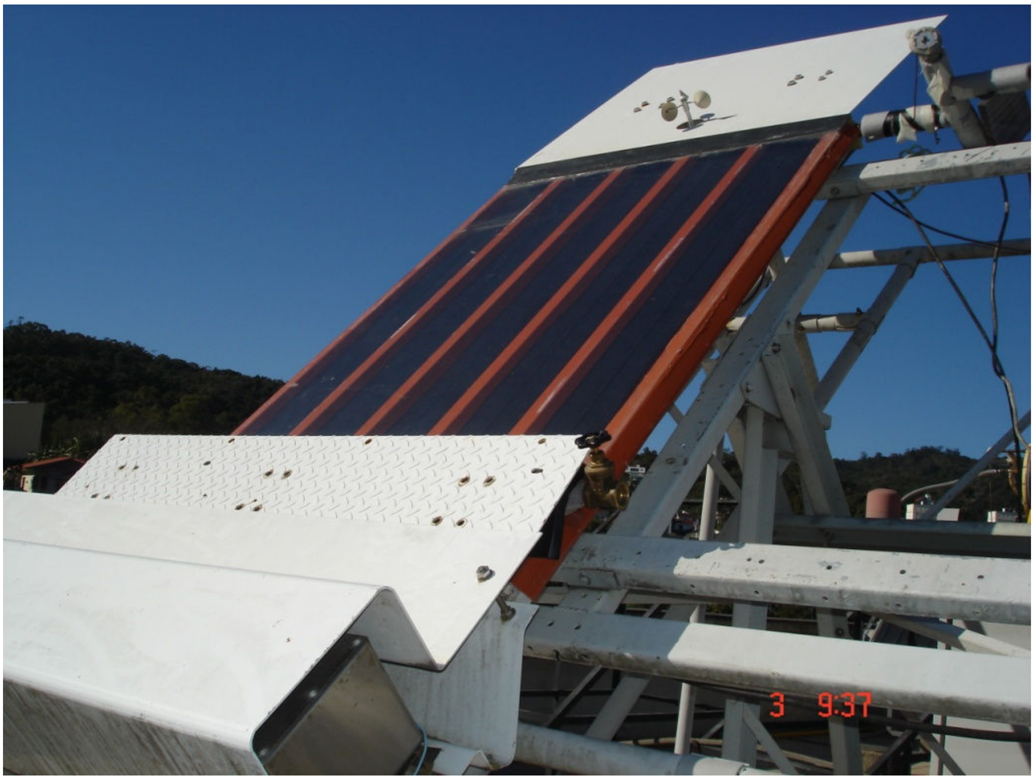


Figura 4 - Colector Solar incorporado na telha metálica instalado na Banca de Ensaios.

A figura anterior mostra a telha de chapa galvalume na cor laranja e as placas absorvedoras a negro. Assim como parte da estrutura metálica que sustenta o colector, fixando-o com um ângulo de 45° em relação ao plano horizontal.

O acesso ao sistema Hidráulico da bancada do LABSOLAR não me foi dado para análise, mas o esquema proposto pela norma ASHRAE 93-77 é muito semelhante e é representado na Figura 5 como segue:

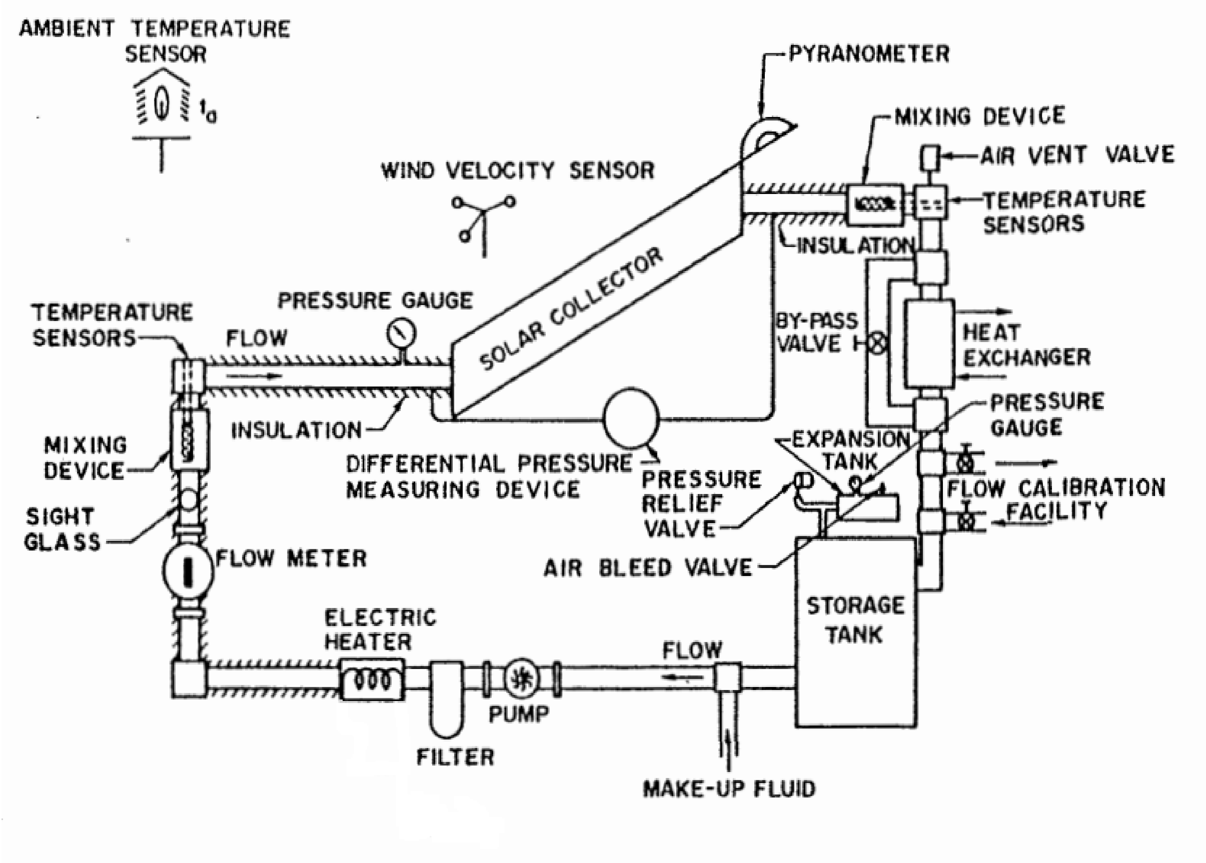


Figura 5 - Configuração da Bancada de Testes para um colector solar quando o fluido de transferência de calor é um líquido. Fonte: Norma ASHRAE 93-1986

As seguintes variáveis devem ser medidas na bancada de ensaios representada pela figura 5:

- Radiação Solar Global na abertura do coletor;
- Radiação Solar Difusa na abertura do coletor;
- Ângulo de incidência da radiação Solar direta ou determinado mediante cálculo;
- Velocidade do vento;
- Temperatura do ar ambiente;
- Temperatura do fluido na entrada do coletor;
- Temperatura do fluido na saída do coletor;

- Vazão do fluido de transferência de calor.

Os componentes do sistema hidráulico da bancada, que visam a medição das variáveis anteriores, são apresentados no ANEXO 3.

A bancada de ensaios tem ainda um permutador de calor, sendo utilizado um chiller, de forma a garantir que a temperatura de entrada de fluido no colector se mantém num valor com variações controladas. O sistema hidráulico funciona em circulação forçada, pelo que utiliza uma bomba que faz o fluido de serviço circular, com um caudal que é controlado manualmente pelas válvulas de passagem. Um reservatório de água, isolado termicamente é utilizado para conferir inércia ao sistema, de forma a simular a acumulação de calor no sistema.

Os aquecedores de passagem que estabelecem os patamares de temperatura, para os quais deve ser testado o colector figuram no esquema como "Electric Heater". O isolamento térmico da tubagem, imposto pela norma está também representado no esquema e faz com que o esquema seja válido para representar a bancada de testes do LABSOLAR.

4.2. Programa de aquisição de dados

Os transdutores que medem as variáveis dos ensaios de colectores estão conectados a uma unidade de aquisição de dados. Um multiplexador de modelo HP 34972 A, do fabricante HP – Agilent. O labview® é o software utilizado no processo de aquisição de dados, os quais são interpretados por um programa desenvolvido pelo aluno bolseiro do LabSolar Guilherme Gonçalves. Esse programa, efectua os cálculos necessários para a avaliação do modelo do colector. Assim, as seguintes operações são realizadas:

- Leitura das frequências, tensões e resistências dos transdutores;
- Tradução das leituras para grandezas de medição;
- Determinação dos ângulos de posição do sol;
- Correcção do erro de cálculo da radiação difusa, provocado pelo anel sombreador;
- Cálculo da potência térmica medida pelo coletor;

- Determinação da potência térmica do modelo do coletor;
- Cálculo da eficiência medida do coletor;
- Cálculo da eficiência do modelo do coletor;
- Apresentação de uma interface onde são apresentados todos os valores da medição;
- Guarda os resultados num ficheiro Excel™.

Na página seguinte, a figura 6 representa o programa num diagrama de blocos:

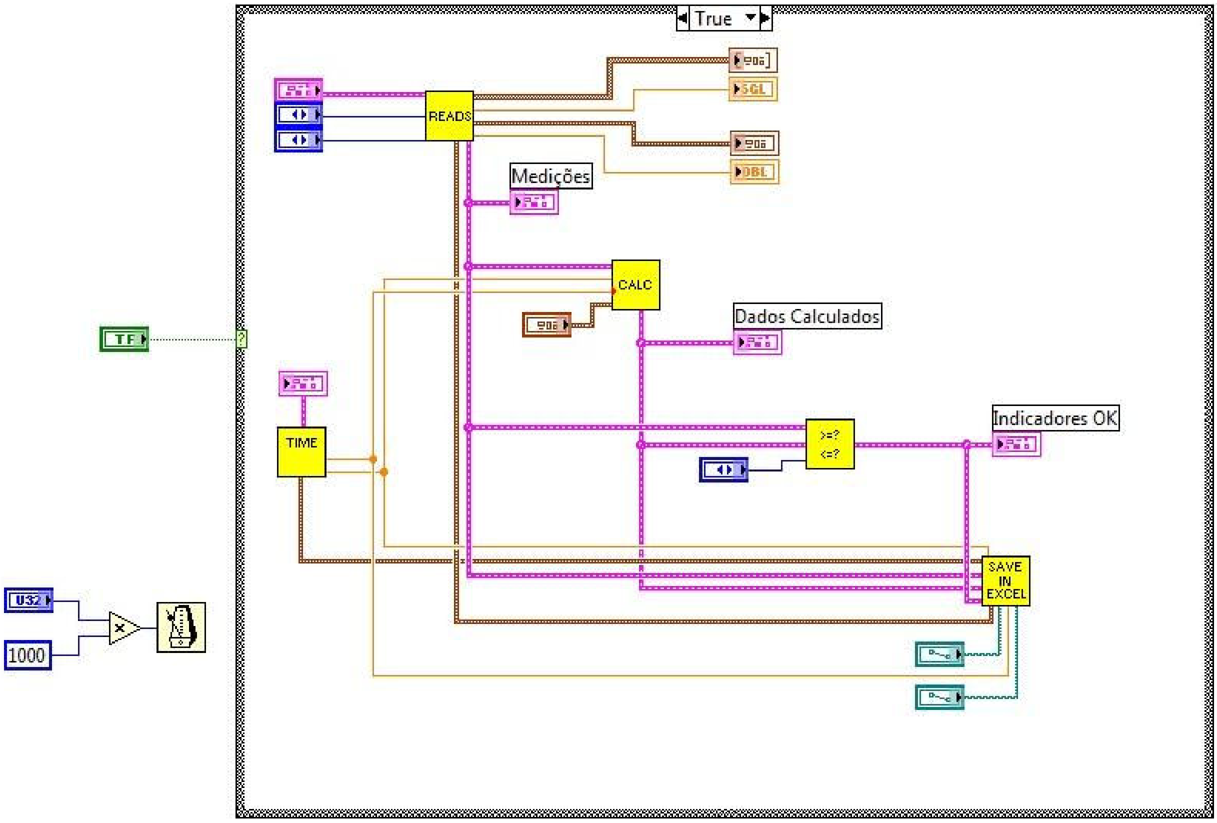


Figura 6 - Diagrama de Blocos do Programa de registo de dados dos Ensaios de Colectores. Fonte: Fonte: Guilherme Gonçalves, Teste_Bancada_Coletores 2008, Labview version 8.5.

Os piranómetros utilizados para registar a radiação solar são do fabricante Kipp & Zonen, do tipo CM10. As expressões para traduzir os valores das tensões para radiação solar estão incluídas no programa. Enquanto a radiação global é medida com o piranómetro localizado acima do colector apenas sendo necessária a leitura da voltagem, a medida da Radiação Difusa é sujeita a correcções pois utiliza um anel sombreador,

como mostra a figura 13. A correcção, segundo o manual do fabricante, é calculada pela seguinte equação:

$$C = \frac{1}{1 - S} \tag{34}$$

Sendo S_v o factor de visibilidade, calculado por

$$S_v = 2 \times V cos(\delta)(\omega_s sen(\phi) sen(\delta) + sen(\omega_s) \cos(\phi) \cos(\delta))/\pi \tag{35}$$

Onde o ângulo do nascer do sol é representado por,

$$\omega_s = -\tan(\phi) . \tan(\delta) \tag{36}$$

V é o ângulo de obstrução do anel de sombreamento a partir do centro do domo do piranómetro. No manual o valor de V tem o valor V=10,6° com um erro associado de ± 0,5%. A figura 7 mostra o cálculo da correcção da radiação difusa devido ao anel sombreador:

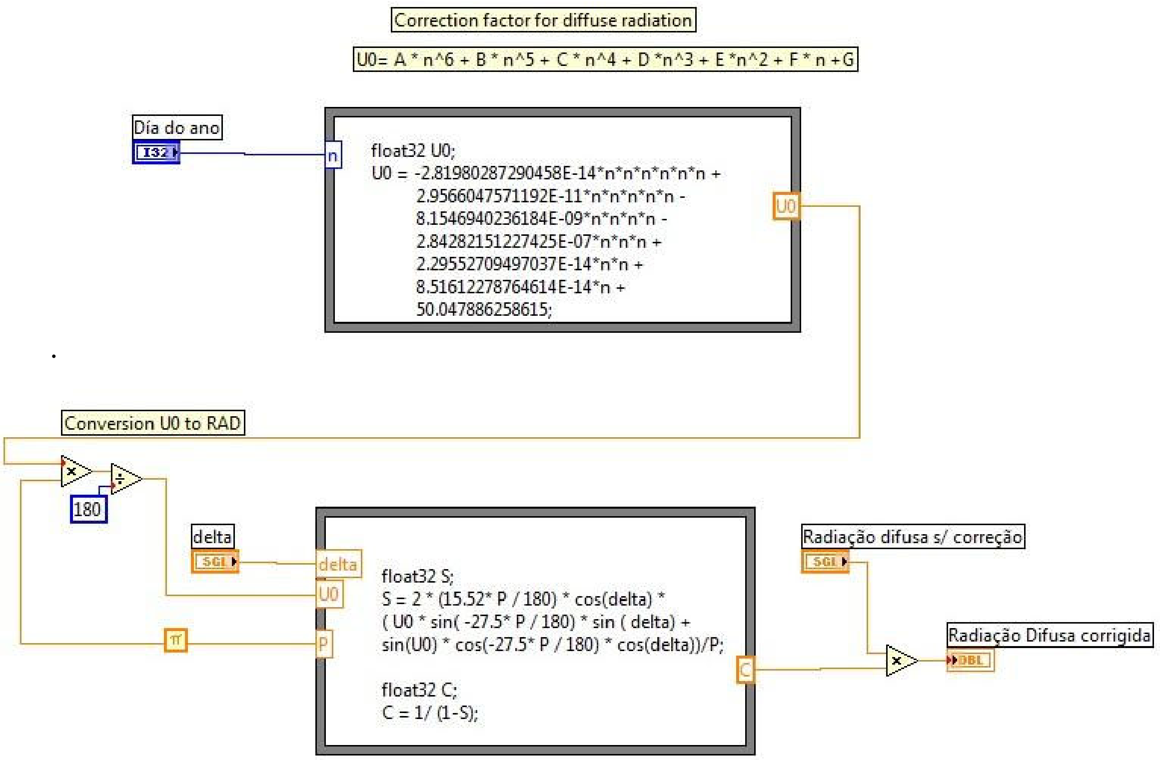


Figura 7 - Bloco de cálculo que efectua a correcção do valor da radiação difusa devido à utilização do anel sombreador. Fonte: Guilherme Gonçalves, Teste_Bancada_Coletores 2008, Labview version 8.5.

O cálculo do caudal volumétrico efectua-se por um transdutor de indução magnética. Uma termo-resistência (registando a temperatura do fluido) é colocada à entrada do medidor de caudal, o que possibilita o cálculo da massa volúmica para, assim calcular o caudal mássico através de uma equação das propriedades da água presente na norma DIN V4757-4:1995-11. A figura seguinte (figura 8) mostra como é realizado esse cálculo no programa:

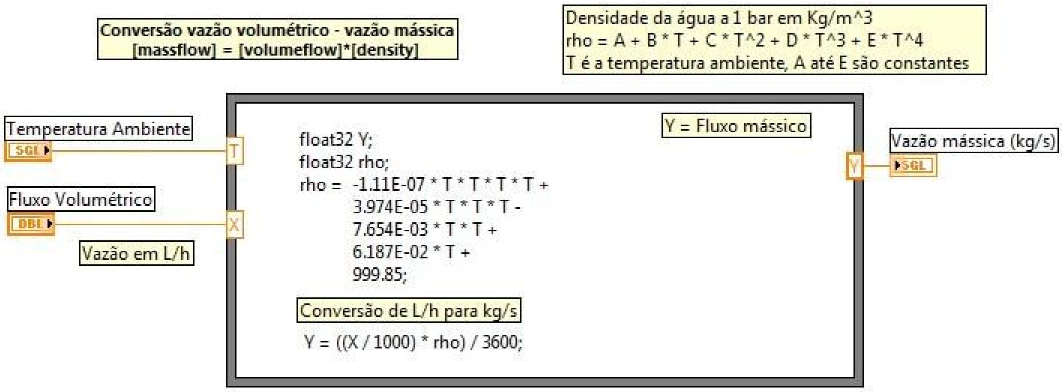


Figura 8 - Bloco de cálculo que converte a vazão volumétrica para vazão mássica. Fonte: Guilherme Gonçalves, Teste_Bancada_Coletores 2008, Labview version 8.5.

A Potência medida também é dependente da temperatura do fluido, influenciada pelo valor do calor específico como mostra a figura seguinte (figura 9):

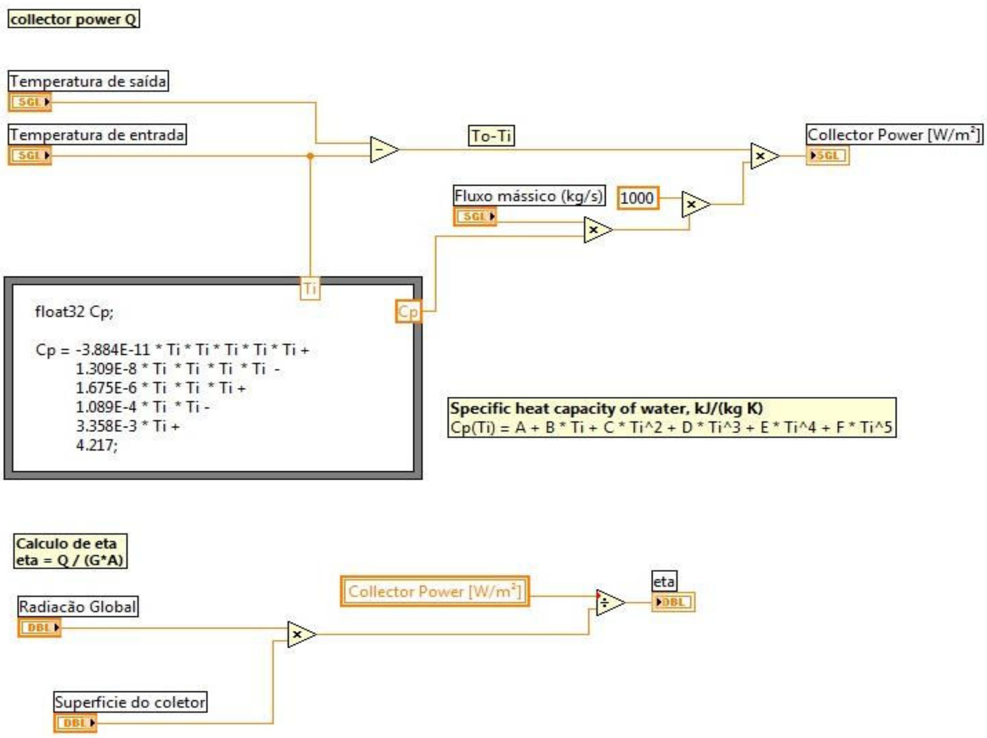


Figura 9 - Bloco de cálculo da potência medida do colector, com a dependência do calor específico pela temperatura. Fonte: Guilherme Gonçalves, Teste_Bancada_Coletores 2008, Labview version 8.5.

4.3. Cálculos Teóricos

Conforme proposto no plano de trabalho, os cálculos teóricos das perdas térmicas do colector, e a transmitância do vidro foram efectuados e são agora apresentados.

Anteriormente foi explicado como é efectuado o cálculo das perdas de calor pelo topo, utilizando o software EES (Engineering Equation Solver) obtém-se a seguinte resposta, na figura 10, para uma temperatura média do fluido de 32°C:

Unit Settings: SI K kPa J mass deg

alfa = 0,00002244	b = 0,003882
Cp = 1005	Di = 0,015 [m]
g = 9,807 [m/s²]	gama = 0,0001 [m]
hw = 10 [W/m²-K]	k = 0,02606
miu = 0,00001883	niu = 0,0000163
q = 131	Ra# = 5207
Ta = 288 [K]	Tc = 296,7 [K]
θ = 15 [deg]	Tm = 305,5
β = 45 [deg]	Cb = 2586
ec = 0,88	ep = 0,86
hc = 2,468	hfi = 300 [W/m²-K]
kb = 66,6 [W/m-K]	L = 0,015 [m]
Nu# = 1,421	patm = 101,3 [kPa]
ρ = 1,155	σ = 5,670E-08 [W/m²-K⁴]
Tcover = 23,59	Tf = 305 [K]
Tp = 314,3 [K]	Ut = 4,977

Figura 10 - Página de resultados, das perdas térmicas, calculados no programa EES. Fonte: EES

O resultado da iteração devolveu um valor U_t de aproximadamente 5 W/m^{2}K. Valor aceitável para as perdas térmicas pelo topo. No entanto o colector também perde calor pelos bordos e pelo fundo, cujas expressões foram enunciadas anteriormente. Os valores das perdas de fundo e de bordo são, respectivamente U_b=1,25 W/m^{2}K e U_e=0,065 W/m^{2}K.

As perdas totais têm o valor:

$$U_L = U_t + U_b + U_e = 6{,}29\ W/m^2K$$

Agora basta calcular, analiticamente, o produto $(\tau\alpha_p)$ e comparar os valores dos ensaios com os calculados teoricamente.

O valor da absortância da placa é de α_p = 0,95 e foi fornecido pelo fabricante. O da transmitância é apenas dependente do tipo de vidro que é usado. A determinação de τ (Duffie & Beckman 2006) para o caso em que não há dependência angular significativa da transmitância, e para uma dada distribuição espectral é calculada como segue:

$$\tau = \sum_{j=1}^{n} \tau_{\lambda,j} . \Delta f_j \tag{37}$$

Onde Δf_j é a faixa de comprimentos de onda para os quais é definido o valor médio da transmitância $\tau_{\lambda,j}$e através da soma destes valores é definido o valor da transmitância da cobertura de vidro.

A definição das faixas de frequências, os valores médios de transmitância nessas faixas e os valores das transmitâncias médias, valores finais, estão expostos na tabela seguinte (Tabela 3):

Tabela 3 – Cálculo teórico da transmitância num vidro branco.

Banda Energética [fi-fi+1]	λ mid	τ λ,mid [0,5%]	τ λ,mid [0,1%]	τ λ,mid [0,02%]
0,00-0,1	0,434	0,8	0,9	0,91
0,1-0,2	0,517	0,75	0,875	0,91
0,2-0,3	0,595	0,45	0,85	0,91
0,3-0,4	0,67	0,3	0,83	0,91
0,4-0,5	0,752	0,2	0,81	0,91
0,5-0,6	0,845	0,12	0,79	0,91
0,6-0,7	0,975	0,09	0,75	0,91
0,7-0,8	1,101	0,06	0,73	0,91
0,8-0,9	1,31	0,04	0,7	0,92
0,9-1,0	2,049	0,24	0,79	0,85
0,00-0,1	0,434	0,8	0,9	0,91
Valores Médios (τ)	-	0,305	0,8025	0,905

Na Tabela 3 é efectuado o cálculo da transmitância em função do comprimento de onda, para 10 faixas do espectro da radiação, de 3 vidros diferentes em teor de Fe_2O_3. Os valores médios são os resultados da transmitância para cada um dos vidros. O vidro utilizado na cobertura dos colectores testados é o que tem 0,02% de teor de Fe_2O_3, e também o que apresenta um valor mais alto da transmitância, τ = 0,905.

Segundo Duffie & Beckman (2006), para colectores de placa plana, as reflexões internas da radiação, podem ser aproximadas pela seguinte expressão:

$$(\tau\alpha_p) \cong 1{,}01\tau\alpha_p \tag{38}$$

O resultado é:

$$(\tau\alpha_p) = 1{,}01\times 0{,}905 \times 0{,}95$$

$$(\tau\alpha_p) = 0{,}86$$

Os resultados dos ensaios serão dependentes do produto $F_R \times (\tau\alpha_p)$ para quantificar os ganhos energéticos e de $F_R \times U_L$ que quantifica as perdas térmicas.

Um gráfico da dependência do ângulo de soldadura entre a placa e o tubo de elevação do fluido, mostrando os valores de F_R, demonstra que não é necessário que o ângulo **α** (figura 11) seja muito superior a 45° pois para ângulos superiores a 10° acontece uma estabilização do gráfico.

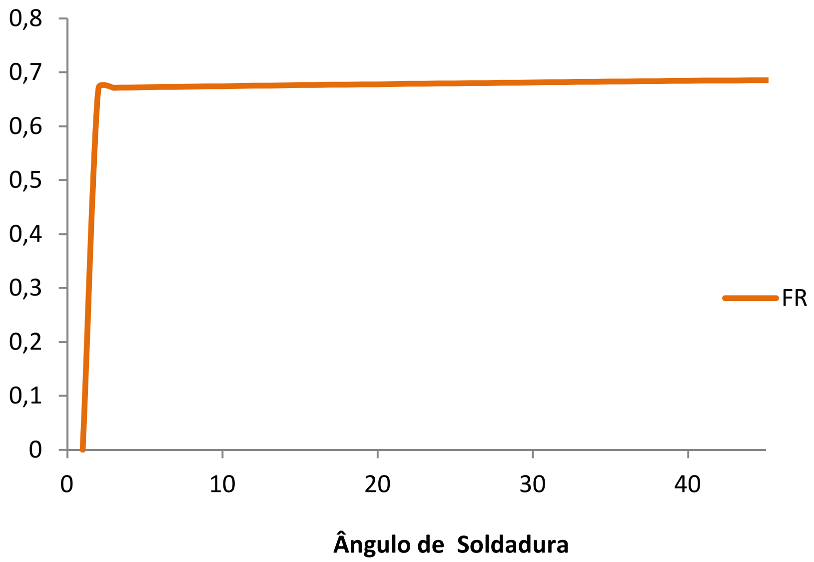


Figura 11 - Gráfico da dependência angular de FR.

De acordo com o gráfico anterior, para um ângulo de 45° o valor de F_R é de aproximadamente 0,685. Então os valores teóricos são os seguintes:

$F_R(\tau\alpha_p) = 0{,}5891$

$F_R U_L = 4{,}31$

A definição destes dois parâmetros indica como o colector absorve e como ele perde energia para o exterior. A equação da potência térmica em condições de regime permanente é expressa, alterando a expressão (21) como segue,

$$Q_u = A_c F_R \left[G_T (\tau\alpha_p)_{av} - U_L (T_i - T_a) \right] \tag{39}$$

Calculando a eficiência, obtém-se

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = F_R(\tau\alpha_p) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{G_T} \tag{40}$$

A eficiência η_i provém dos ensaios do colector. O que será comparado posteriormente são os valores dependentes de F_R, agora identificados e obtidos através da recta que minimiza as distâncias dos pontos das dispersões medidas e modeladas. Assim $F_R(\tau\alpha_p)$ será o valor da intercepção da curva da eficiência com o eixo vertical e $F_R U_L$ o valor do declive da recta que minimiza a distância dos pontos da dispersão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios dos colectores solares efectuados na bancada do LabSolar foram feitos com o objectivo de cumprir a norma Brasileira ABNT/CB-55, que se baseia nas normas EN12975 e ISO 9806. Todos os ensaios foram efectuados em regime QDT. Mesmo com a variação das temperaturas do fluido de entrada no colector, pelo operador do ensaio, nem sempre é fácil prever o que acontecerá durante o dia, em termos meteorológicos e por esse facto grande parte das medições não são validadas.

Foram testados dois colectores solares na bancada, e medidas as variáveis pelos transdutores. Nos ensaios onde foram validados valores, apenas se conseguiram 3 amostras em ensaio QDT, duas para o colector, protótipo, integrado na telha e uma de um colector de eficiência média, pertencente ao LABSOLAR. Das duas amostras resultantes do QDT, para o colector protótipo, uma validou os seus valores perante os limites do SST do colector integrado na telha. Dessa forma é possível fazer uma comparação entre ambos os regimes de teste dos colectores.

O gráfico seguinte, figura 12, mostra as fracções da radiação Solar e a radiação Global, para um ensaio em regime quasi dinâmico:

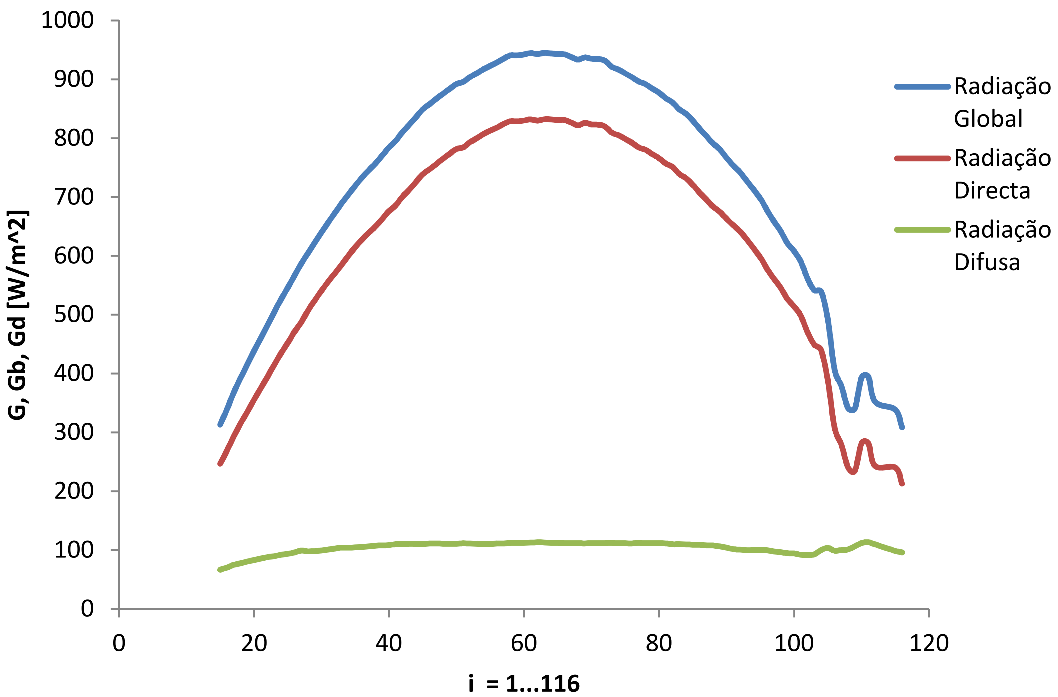


Figura 12 - Gráfico da Radiação Solar no dia 17 de Junho de 2011.

A figura 13 apresenta o comportamento típico da radiação Solar para um dia de céu limpo. Existe uma pequena oscilação dos valores da radiação no final da curva que se deve à existência de nuvens. A radiação difusa mantém-se num nível de 100 [W/m^2] ao passo que a radiação directa aumenta o seu valor até ao elemento 60 (meio dia solar) para depois voltar a decrescer até ao final do dia. O gráfico seguinte, Figura 13, demonstra como a diferença de temperatura do fluido e do ambiente depende da radiação solar total.

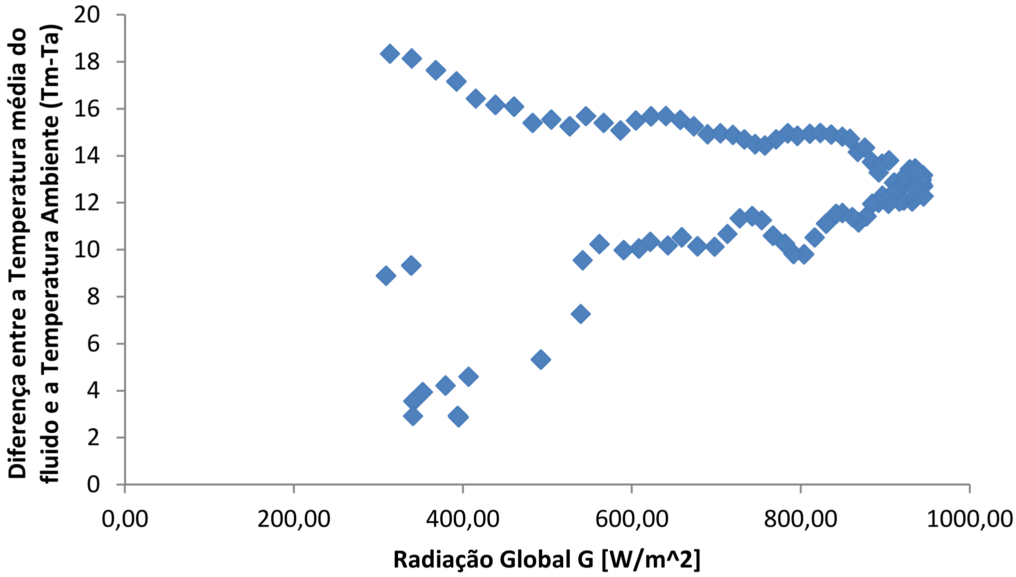


Figura 13 - Gráfico da diferença de temperaturas em função da Radiação Global.

O gráfico anterior apresenta uma concentração de valores na faixa de ΔT que vai de 12 a 14 °C, sendo nessa faixa que os valores da radiação são os mais elevados. Essa concentração é útil para a determinação da eficiência do colector, no entanto para valores de ΔT elevados correspondem perdas térmicas superiores. A água é aquecida a 40 ^{0}C no aquecedor de passagem e como a temperatura ambiente está entre [20-27] ^{0}C. Podem identificar-se as duas partes do dia, onde a parte inferior corresponde ao período da tarde, onde os valores da temperatura ambiente são mais elevados. Os valores acima da concentração de pontos correspondem à manhã, onde os níveis de

radiação são os mesmos, mas o ambiente está mais frio permitindo um valor ΔT superior.

O sistema hidráulico tem algumas perdas de temperatura para o exterior, porque o isolamento não é ideal. São registados valores da temperatura do fluido à entrada do colector entre [36-38] ^{0}C, e contando com a subida da temperatura ambiente até valores por volta dos 28 ^{0}C o valor dos coeficientes de perdas térmicas do modelo do colector é reduzido, quando se reduz o valor de ΔT.

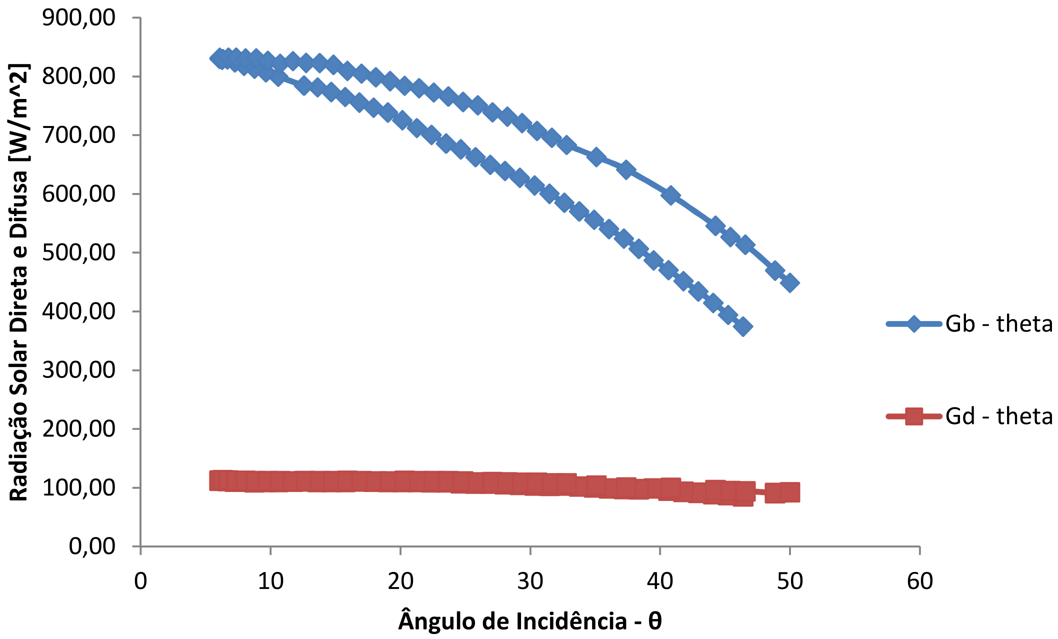


Figura 14 - Radiação Solar directa e difusa para vários ângulos de incidência.

A figura 14 demonstra a dependência entre o ângulo de incidência e a radiação directa. Podemos observar que o ângulo (θ) nunca chega a ser zero (0^0) e os valores do ângulo nunca excedem os sessenta graus (60^0) conforme os parâmetros de validação dos ensaios.

A radiação difusa é pouco influenciada pela variação do ângulo de incidência e os valores da radiação directa (a azul) estão todos incluídos no primeiro quadrante. Existe uma concentração de pontos nos valores mais baixos do ângulo de incidência, pois é para esses pontos que a radiação solar é mais elevada e como o ângulo

de incidência está perto da normal ($\theta < 15^0$), há uma taxa de validação de valores elevada.

A figura 15 (situada abaixo) é confirmada a dependência da radiação difusa com a radiação global, no entanto a radiação difusa situa-se entre os valores [85-115] W/m^2 enquanto a radiação global aumenta o seu valor devido ao aumento da radiação directa.

A dispersão assemelha-se a uma recta, descrevendo a evolução da radiação difusa quando a radiação directa aumenta. Por isso, podemos dizer que a radiação difusa aumenta o seu valor linearmente com a radiação directa até o valor de radiação solar mais elevado. Depois desse valor a radiação difusa reduz-se fixando os pontos de depois do meio-dia solar, abaixo da curva inicialmente traçada.

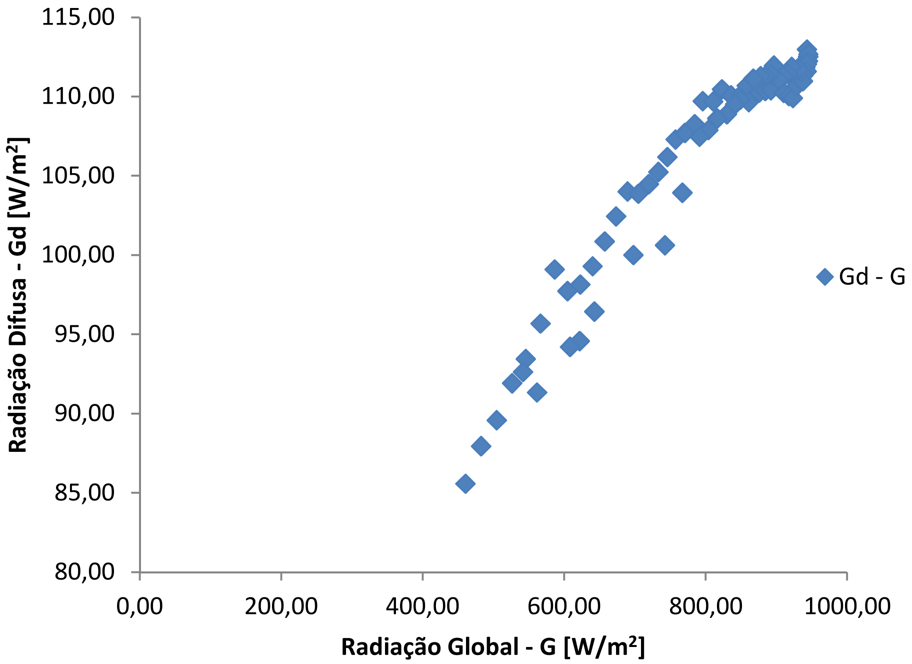


Figura 15 - Gráfico da dependência entre Radiação Difusa e Radiação Global.

Para o ensaio do colector integrado na telha, de dia 17 de Junho de 2011 foi possível validar dados das medições e efectuar a regressão multi-linear de forma a obter os coeficientes do modelo para traçar as curvas de eficiência do colector:

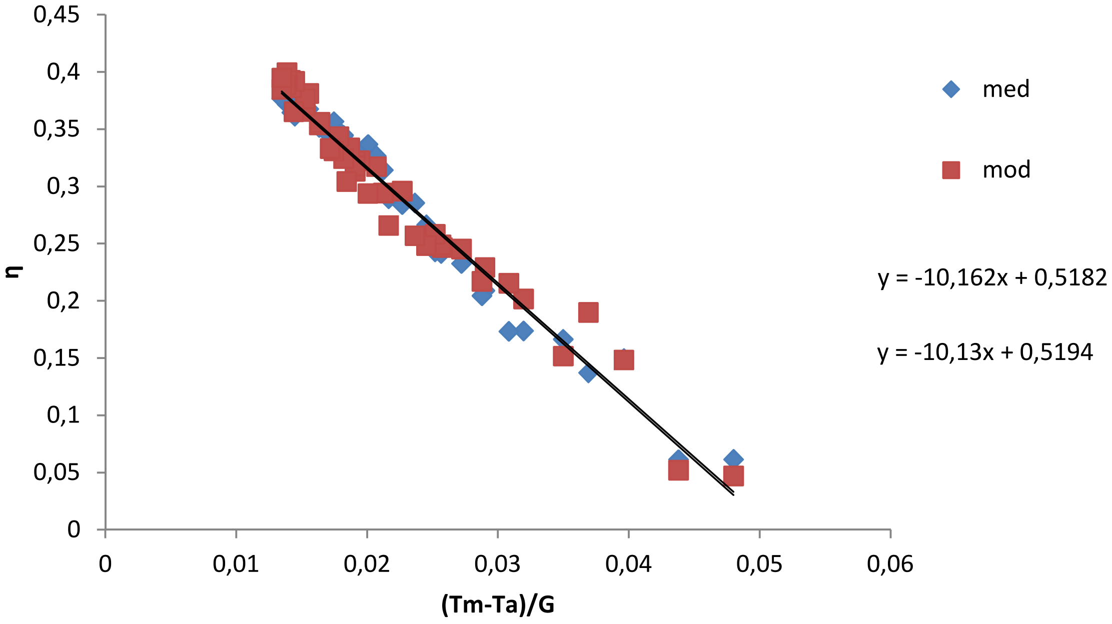


Figura 16 - Gráfico da eficiência medida e eficiência do modelo.

Como é perceptível na figura 16 há uma boa aproximação do modelo aos valores medidos e isso se deve à estabilidade da vazão, e controlo da temperatura de entrada com variações inferiores a 1K.

As equações que minimizam os pontos da medição e os pontos calculados pelo modelo são, respectivamente:

$$y = -10{,}162x + 0{,}5182$$

$$y = -10{,}13x + 0{,}5194$$

onde,

$F_R\ (\tau\alpha_p)_{exp} = 0{,}5182$

$F_R U_{L\ exp} = 10$

Comparando com os valores calculados teoricamente,

$F_R(\tau\alpha_p) = 0{,}5891$

$F_R U_L = 4{,}31$

Observa-se nos dados do ensaio, maiores perdas térmicas e menores ganhos provenientes da radiação quando comparamos estes valores aos valores calculados teoricamente. O elevado factor das perdas térmicas, nos dados do ensaio fica a dever-se ao isolamento deficiente do colector, sendo que as perdas são em mais que 2 vezes superiores do valor teórico.

Os coeficientes resultantes da regressão multi-linear são apresentados como segue,

Tabela 4 – Coeficientes calculados pela regressão multi-linear e suas incertezas.

Coeficientes MLR		Incertz. Padrão u(i)	Incertz. Expandida U(i)
a1=	0,47	0,05	0,085
a2=	-0,337	0,087	0,146
a3=	-1,44	0,22	0,37
a4=	34,38	5,41	9,01
a5=	-1,80	0,25	0,42
a6=	6437	960	1598

A incerteza padrão da regressão é calculada pela seguinte expressão:

$$u(a_j) = s^2 = E(\sigma^2) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_i)^2}{n-k} \tag{41}$$

A incerteza expandida é calculada a partir da variância dos coeficientes, var(a_j), onde o número de coeficientes é j=1 a 6. Para um nível de confiança (1-α)100% = 95%. Deve utilizar-se um coeficiente de student de $t_{\alpha/2,n-k}$ com um grau de significância α/2 e com *(n-k)* graus de liberdade. Com *n* sendo o número de pontos de medição (número de dados validados) e *k* o número de coeficientes do sistema (o modelo adoptado tem 6 coeficientes). A expressão é a seguinte:

$$U(a_j) = \pm t_{\alpha/2,n-k} \, . \, u(a_j) \qquad (42)$$

Os coeficientes do colector são expostos na Tabela 5, apresentada como segue

Tabela 5 - Coeficientes do colector calculados pela regressão multi-linear e a sua incerteza expandida.

Coeficientes do Coletor		Incertz. Expandida
η0=	0,47	0,085
b0=	-0,72	0,146
Kθd=	-3,09	0,366
k1=	34,38	9,01
k2=	-1,80	0,42
Ceff=	6437	1598

A eficiência do colector, sem perdas η_0 é baixa e o projecto do colector devia ser revisto. O factor de perdas térmicas linear k_1 é muito elevado e demonstra que o isolamento não foi aplicado da forma correcta. A incerteza expandida $U(k_1)$ também tem um valor elevado, pois está relacionado com o elevado valor do coeficiente que lhe corresponde. A incerteza não é fiável e o melhor seria efectuar novos testes, de forma a reduzir as incertezas dos ensaios.

O factor de correcção angular para a radiação difusa também tem um valor elevado, comparando com outros ensaios em que o valor deste coeficiente varia em torno da unidade. O aumento deste valor pode ser uma consequência da acumulação de sujidade no vidro. Fazendo com que a influência da radiação difusa seja menor, no balanço da radiação absorvida pelo colector.

A estrutura do colector solar tem bastante influência na sua eficiência óptica. Como o colector é integrado numa telha, e esta tem pontos de contacto com o vidro, isso provoca um aquecimento do mesmo, originando maiores reflexões da luz devido ao comportamento do vidro. A opacidade do vidro aumenta com a temperatura do mesmo, que é aquecido devido à crescente reflectividade do aço galvalume (liga de zinco com alumínio), reflexão essa que aumenta para valores de comprimento de onda de radiação superiores a 3 μm.

A telha que aquece o vidro devido ao contacto existente, entre ambos, ganha temperatura e desta forma são criadas correntes de ar no interior do colector, o que desencadeia o mecanismo da convecção natural na zona da telha sombreada pelas placas absorvedoras. Essas movimentações de ar por convecção natural promovem a perda de calor do colector para o exterior, dessa forma reduzindo a eficiência energética.

Os pontos do comportamento térmico e óptico do colector abordados, embora reconhecidos como fonte de perdas de eficiência do colector, não têm tanta preponderância como a faltam de área de absorção do colector ocupado pelo perfil da telha.

5.1. Ensaio em regime Permanente

O ensaio em regime permanente só pode ser comparado com os valores do ensaio quase dinâmico, quando se efectua a normalização das curvas de eficiência. Essa normalização foi apresentada anteriormente. Os dados do dia 28 de Junho de 2011 são agora utilizados para fazer a comparação entre os dois regimes. Os resultados do ensaio em regime quase dinâmico são os seguintes:

Tabela 6 - Coeficientes do Colector obtidos pela regressão multi-linear em regime quase dinâmico.

Coeficientes do Colector_QDT	
η0=	0,51
b0=	-0,22
Kθd=	1,67
k1=	-12,77
k2=	0,22
Ceff=	-7808

Para traçar a curva normalizada é necessário saber qual o valor do factor de correcção para a radiação directa, da equação (49), com um ângulo de incidência de 15°

Tabela 7 - Factor de correcção da radiação solar directa.

θ	0	10	15	20	30	40	50	60	70	90
Kθb	1	0,997	0,992	0,986	0,966	0,933	0,878	0,780	0,577	0

Assim, o cálculo da eficiência normalizada pela expressão (33), tem o valor

$$\eta_{0,norm} = 0{,}5605$$

E os coeficientes do colector obtidos pelo ensaio SST, são:

Tabela 8 - Coeficientes SST do Colector obtidos pela regressão multi-linear

coef. Ensaio SST e do colector		Incertz. Padrão u(i)	Incertz. Expandida U(i)
η0=	0,66	0,03	0,05
k1=	-34,11	4,16	6,92
k2=	1,14	0,17	0,28

As curvas de eficiência de ambos os ensaios são traçadas na Figura 17:

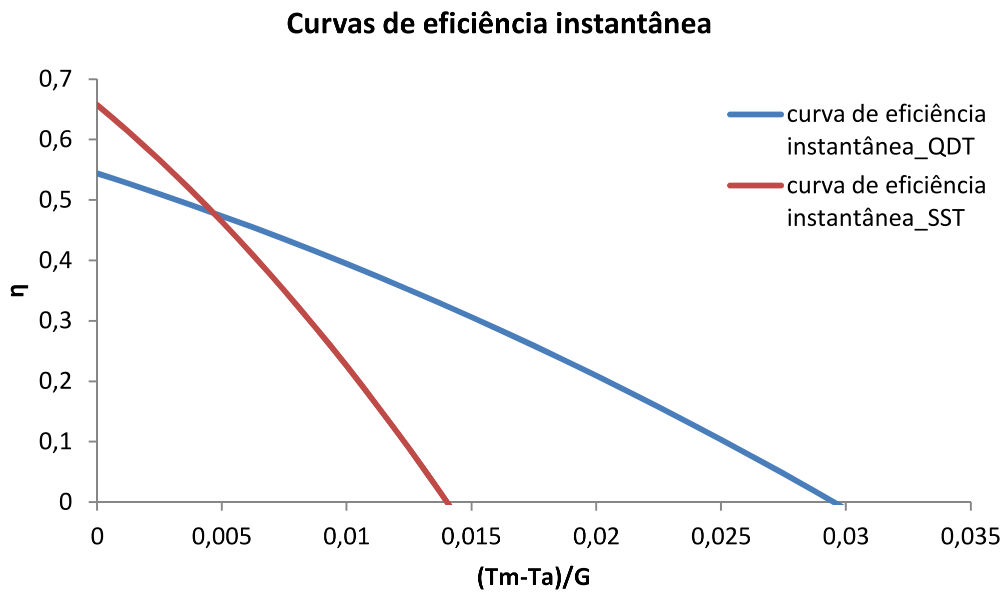


Figura 17 - Curvas de eficiência instantânea para ensaios em regime quase dinâmico e em regime permanente no dia 28 de Junho de 2011.

Existe um desfasamento claro entre ambas as curvas, devido ao coeficiente linear de perdas térmicas no ensaio QDT ser aproximadamente 3 vezes menor que o do ensaio SST. Dessa forma, na curva SST, os valores seleccionados ilustram maiores ganhos de radiação, mas também maiores perdas térmicas. O coeficiente quadrático de perdas térmicas também é superior para a curva do ensaio em regime permanente.

A intercepção das curvas com o eixo vertical dá o valor da eficiência do colector sem perdas térmicas, pois é nesse eixo que a temperatura ambiente é igual à temperatura média do fluido no colector. A partir desse ponto podemos reparar que o desenvolvimento da curva SST é traçada com menos valores no primeiro quadrante do que a curva QDT e este comportamento se deve ao menor número de dados validados para o ensaio em regime permanente.

5.2. Eficiência energética do colector dependendo da área

A grande diferença do colector integrado na telha metálica para os demais colectores à venda no mercado é a área de absorção da radiação solar, que é diminuída, em comparação com a sua área de abertura. Procedeu-se ao cálculo da eficiência energética do colector em função da área de abertura e da área do absorvedor. Os termos dos ganhos e das perdas térmicas são os seguintes:

Para a eficiência baseada na área do absorvedor,

- $F_R(\tau\alpha_p) = 0{,}67$
- $F_RU_L = 10{,}31$

e para a da área de abertura,

- $F_R(\tau\alpha_p) = 0{,}52$
- $F_RU_L = 10{,}16$

Comparando os valores verifica-se que o colector integrado na telha perde uma parte significativa da radiação nele incidente devido ao seu perfil, que não permite a inclusão de um maior número de placas absorvedoras. Cerca de 30% da radiação solar

não é utilizada. Essa energia contribuirá para aquecer o colector ao invés de ser transmitida eficazmente para o fluido. O que faz o nível de perdas térmicas aumentar, e como foi mencionado em parágrafos anteriores aumenta a opacidade do vidro impedindo a entrada de uma maior quantidade de radiação solar.

É notória a diferença entre os ganhos térmicos $F_R(\tau\alpha_p)$ para as duas áreas introduzidas no cálculo. A área dos elementos absorvedores e a área de abertura, para colectores solares de placas absorvedoras dispostas em paralelo tem valores próximos, para aproveitar ao máximo a área do colector no processo de conversão de energia. Portanto, uma melhoria plausível para a telha seria a de eliminar (entenda-se eliminar, como transformar parte da telha numa superfície plana) o perfil da mesma numa fracção do telhado para aumentar a área de absorção das placas absorvedoras.

5.3. Comparação do colector protótipo com um colector de eficiência média

Um colector solar de placa plana com eficiência média foi sujeito a testes na bancada de ensaios para constituir um elemento de comparação com o colector em estudo. A figura seguinte, Figura 18, mostra o colector montado na bancada:



Figura 18 - Colector CSP - 140V testado na Bancada do LabSolar.

Os coeficientes do colector foram calculados pelo mesmo procedimento aplicado ao colector integrado na telha. Os valores dos coeficientes figuram na tabela seguinte,

Tabela 9 – Coeficientes do Colector de eficiência média

Coeficientes do Colector	
η0=	0,72
b0=	-0,46
Kθd=	1,16
k1=	-4,67
k2=	-2,05
Ceff=	-15132

Os valores da tabela anterior revelam que o colector testado tem uma boa eficiência, e não perde muita energia para o exterior. O factor de correcção da radiação difusa toma valores mais reduzidos e a sensibilidade ao ângulo de incidência no factor de correcção da radiação directa é superior à do protótipo.

Os valores das eficiências medida e modelada para ambos os colectores estão presentes no gráfico da Figura 19:

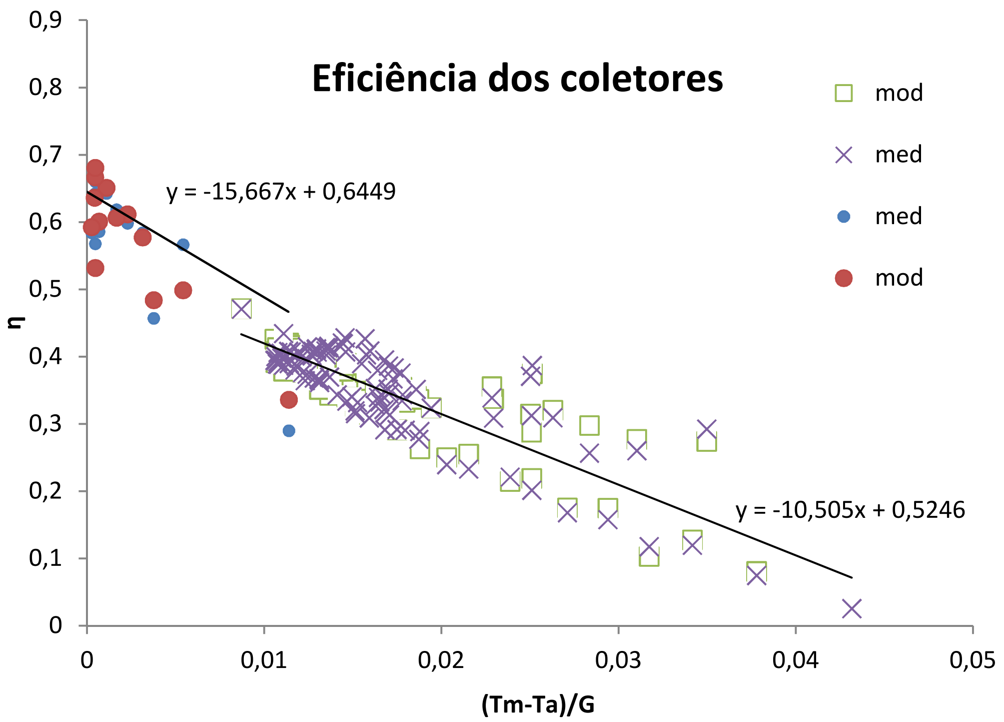


Figura 19 - Eficiências experimentais dos colectores de placa plana: Azul-Vermelho colector de eficiência média; Verde-Roxo colector integrado na telha.

Podemos verificar que existem duas acumulações de pontos, uma para cada colector ensaiado. São traçadas linhas de tendência nos pontos de cada ensaio e as equações destas exprimem as características dos colectores. Os pontos mais próximos do eixo vertical correspondem ao colector de eficiência média, e os situados mais ao centro correspondem ao colector em estudo, o de placas absorvedoras integradas no perfil da telha. O colector de eficiência média tem uma eficiência sem perdas melhor, embora com um valor das perdas térmicas superior. O colector integrado na telha obtém resultados piores da absorção de radiação, mas o nível de perdas térmicas é inferior. As equações podem ser retiradas do gráfico e integradas em programas de simulação em regime transiente.

A melhor comparação dos valores de eficiência para os dois colectores é feita pelas curvas de eficiência normalizada de cada colector. A Figura 20 demonstra a curva de eficiência normalizada do colector testado em regime permanente e a curva de eficiência normalizada do colector de eficiência média:

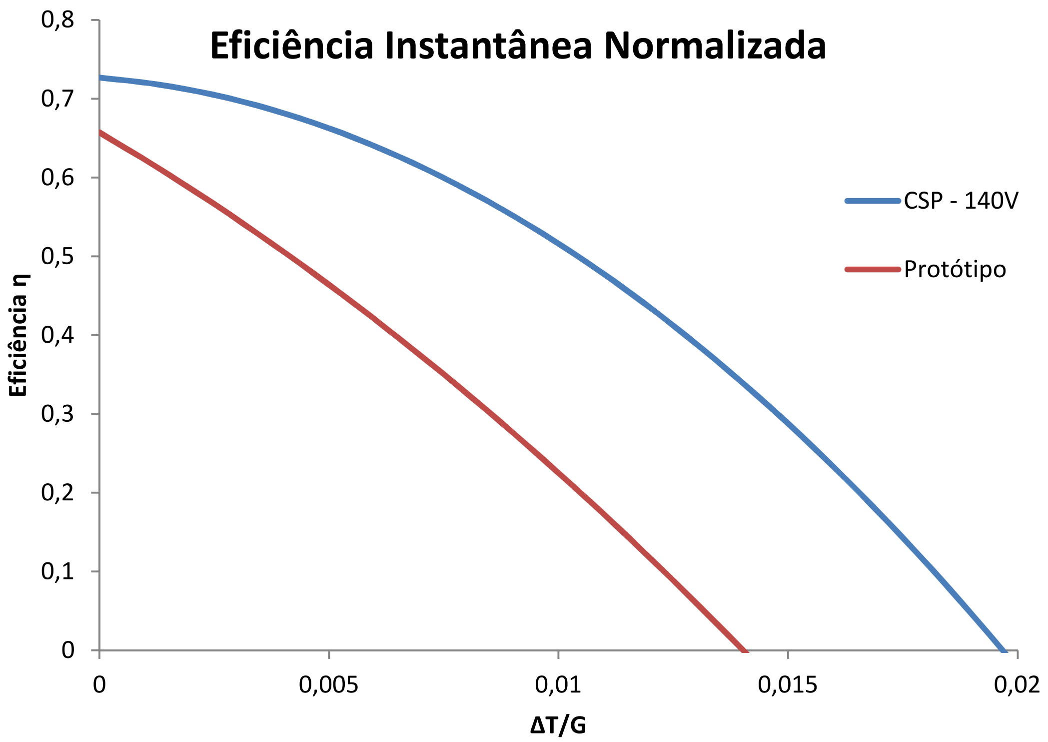


Figura 20 - Comparação das eficiências normalizadas para os colectores CSP-140V e Protótipo.

Na figura das eficiências normalizadas é fácil distinguir os colectores testados pois os valores de eficiência do colector de eficiência média (modelo CSP-140V) são superiores aos do protótipo. Os valores de eficiência do Protótipo foram obtidos num ensaio em regime permanente, portanto a eficiência é a máxima que se pode conseguir. No entanto o colector CSP – 140V tem maior eficiência pois para além de aproveitar o máximo de espaço da sua abertura, aumentando a área de absorção, tem um isolamento térmico melhor.

A curvatura do colector CSP – 140V apresenta um declive menor, enquanto o colector protótipo, tendo menos valores validados e um declive mais acentuado tem uma curvatura menor, indicando um nível de perdas térmicas bastante alto. A curvatura indica um coeficiente de perdas quadrático de valor superior para o colector CSP – 140V.

5.4. Modelação Transiente do Colector Solar

O software escolhido para modelar o comportamento do colector foi o TRNSYS – Transient System Simulation Program.

O TRNSYS utiliza-se para simulação de sistemas energéticos em regime transiente, onde podem ser calculados os valores das temperaturas do reservatório, e da potência solar. É um bom Software para a resolução de sistemas lineares com comportamento transiente. Funciona com módulos pré-existentes incluídos no programa, que só precisam ser introduzidos nos sistemas e ligados para funcionar.

O programa contém vários exemplos de sistemas térmicos, dos quais foi utilizado o SDHW – Solar Domestic Hot Water, para simular o comportamento do colector solar. Integrado num sistema com reservatório de água e perfil de consumo de água quente predefinido.

O esquema do sistema SDHW é representado pela Figura 21:

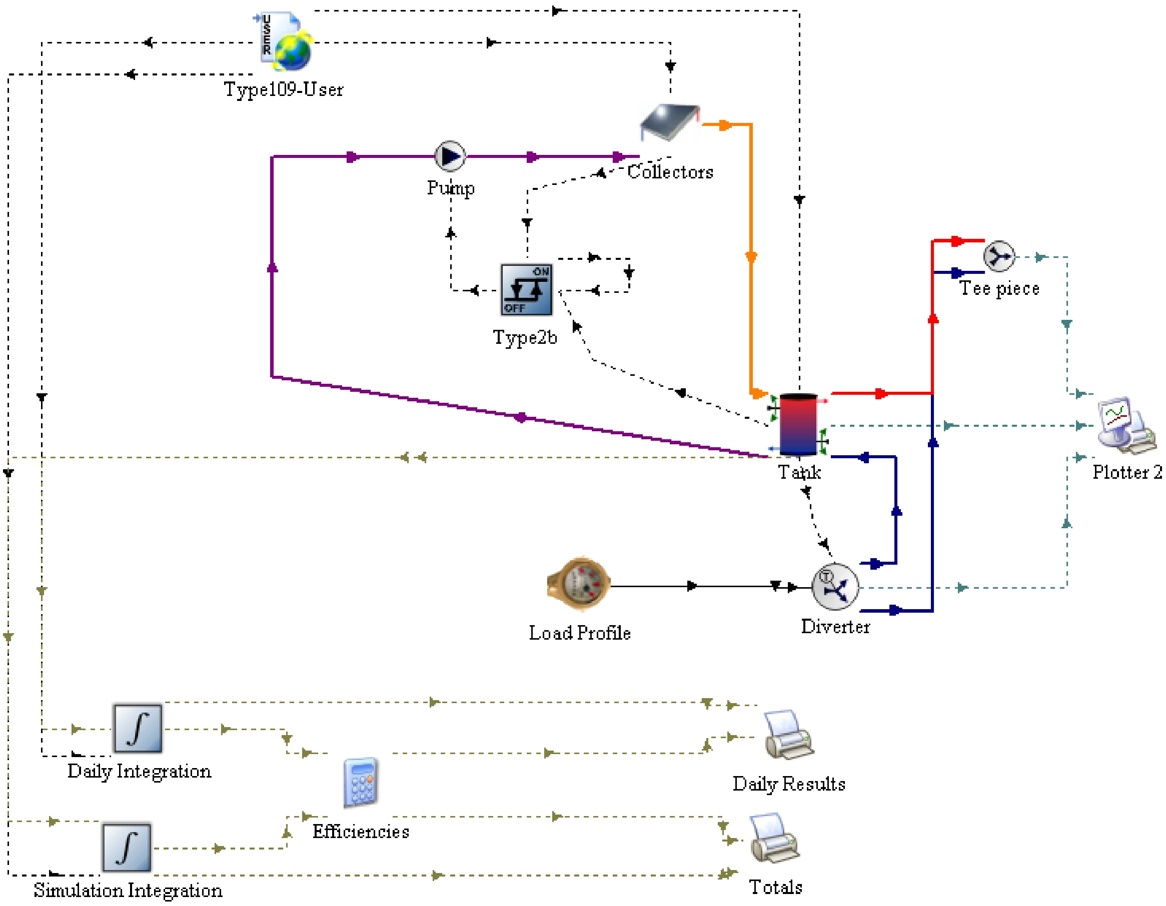


Figura 21 - Sistema SDHW incluído nos exemplos de sistemas térmicos. Fonte: TRNSYS, exemplo SDHW.

O sistema representa uma instalação usual de aquecimento solar da água para banhos, onde o perfil de consumo é pré definido pelo sistema com um pico entre as 18h e as 19h de cada dia. Os dados do TMY são retirados da base de dados SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment, que como foi mencionado anteriormente indica os valores típicos da irradiação solar e temperatura para um dado local no período de um ano. Neste caso o teste foi feito para a cidade de Florianópolis.

O reservatório de água quente é estratificado e mantido entre os 45 °C e os 15 °C tendo uma fonte de aquecimento auxiliar eléctrica para compensar períodos de baixa fracção solar. O volume do reservatório é de 300l.

O Perfil de consumo é representado na Figura 22:

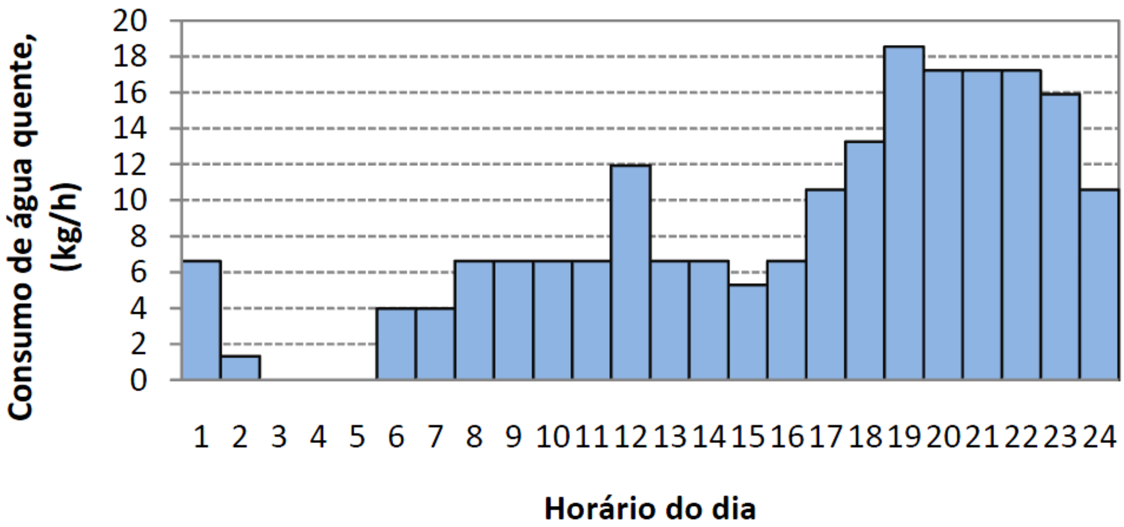


Figura 22 - Perfil de Consumo de água quente doméstica.

O colector solar é definido pelos parâmetros retirados dos ensaios, $F_R(\tau\alpha_p)$ e F_RU_L especificando as características energéticas do colector, pois a expressão utilizada para a modelação apenas inclui perdas térmicas lineares. Na simulação a água que circula dentro do colector está em circulação forçada por uma bomba que debita um caudal máximo de 200 kg/h.

O objectivo da utilização do programa é obter informações sobre a fracção solar ao variar a área instalada de colectores. A fracção solar de um sistema representa a quantidade de energia solar que passa a ser utilizada pelo sistema, dada pelo quociente

entre a energia solar absorvida e a necessidade energética total do sistema. O registo de valores é feito para os períodos, diário e anual. É utilizado o anual pois totaliza todas as informações sobre o colector.

O sistema modelado tem as seguintes características:

- Orientação do Coletor: Norte,
- Ângulo de inclinação da superfície: Latitude+10° = 37,5°,
- Volume do reservatório: 300l,
- Caudal de Teste: 75 kg/h.m^2
- Taxa de perdas térmicas: 0,972 W/K,
- Temperatura ambiente: 20°C,
- Temperatura do Set-Point: 60°C,
- Água quente: 45°C,
- Água fria: 15 °C.

O sistema foi simulado para Florianópolis, e obtiveram-se os seguintes valores:

Tabela 10 – Comportamento energético do sistema para várias áreas de colector solar.

Área de Abertura [m^2]	QDHW	Q Auxiliar	Fracção Solar
2	5,19E+06	3,86E+06	0,256
3	5,18E+06	3,35E+06	0,354
4	5.18E+06	2.79E+06	0,461
6	5.18E+06	2.14E+06	0,587
8	5.19E+06	1.83E+06	0, 648
10	5.19E+06	1.65E+06	0,681

Na tabela 10 verifica-se o crescimento da fracção solar com o valor da área de abertura do colector. Ao mesmo tempo que a necessidade de aquecimento auxiliar baixa, constituindo uma economização de electricidade no sistema. O aquecimento de água doméstica mantém-se praticamente invariável, pois o perfil de consumo é uma imposição da simulação.

Usualmente o aumento da área de colector cria custos adicionais nos sistemas de aquecimento de água doméstica. No sistema em estudo o preço do colector é relativamente baixo. Se a área aumentar até um valor de 6 m^2 a energia solar irá suprir mais de metade das necessidades de aquecimento de água, portanto é necessário saber o custo real do colector para poder efectuar uma boa análise de custos. Como as placas

que absorvem a energia solar fazem parte do telhado alguns gastos podem deixar de existir como, a caixa metálica e os custos de instalação dos colectores.

A simulação do sistema para diferentes volumes do reservatório de água despertou o interesse com o objectivo de saber qual o volume ideal. Com uma área fixa de 2 m^2 de colector, a tabela seguinte:

Tabela 11 – Valores do volume do reservatório simulados no período de um ano.

Volume do Reservatório [l]	QDHW	Q Auxiliar	Fracção Solar
100	5,19E+06	3.93E+06	0,243
150	5,19E+06	3,90E+06	0,247
200	5,19E+06	3,93E+06	0,242
300	5,19E+06	3,86E+06	0,256
400	5,19E+06	3,891E+06	0,250

O volume do reservatório tem pequenas flutuações da Fracção Solar mas não é suficiente para dizer que é um factor importante como é a área do colector.

Outros elementos poderiam ter sido testados no exemplo SDHW, mas o objectivo era confirmar a dependência da área com a fracção solar. Com o valor da fracção solar é possível fazer uma análise económica de retorno de investimento do sistema do colector solar.

5.5. Análise Económica do Colector Solar

O estudo económico do investimento em sistemas solares está no seguimento do cálculo da eficiência dos colectores solares, que foi feito em capítulos anteriores.

O método utilizado para analisar o investimento, foi o método LCS (Life Cycle Savings) conforme é apresentado no capítulo 11 de Duffie & Beckmann (2006). Analisa os custos do ciclo de vida (LCC – Life Cycle Cost) do sistema de aquecimento de água se não existisse a conversão de energia solar, comparando esse valor para uma

situação em que é utilizado um colector solar no sistema, assim calculando o valor ganho. O esquema de análise do investimento é feito por um diagrama de cash-flow de prestações constantes e a taxa de juro de interesse no investimento. Efectuou-se o cálculo do período de retorno quando o montante investido é suprido pelos ganhos do sistema solar, pela análise do VLA, conforme a expressão seguinte:

$$VLA = \sum_{i=0}^{N} \frac{CF}{(1+d)^i} \tag{43}$$

A fracção solar calculada pela simulação transiente do colector define a quantidade de energia eléctrica utilizada, esta é sujeita a uma tarifa por kWh, que para o segmento residencial é de 0,32 R$/kWh. O imposto sobre a electricidade é de 25%, e portanto a tarifa final da electricidade é de 0,41 R$/kWh.

A tabela seguinte demonstra como a economia de energia devido ao sistema solar varia com a área de abertura do colector.

Tabela 12 – Variação da Economia do Sistema com Aquecimento Solar em Função da Área de abertura do Colector.

Área [m^2]	Gasto Com Energia Eléctrica sem Aquecimento Solar (R$)	Gasto de Energia Eléctrica com Aquecimento Solar (R$)	Economia de Energia com Aquecimento Solar (R$)
2	585	435	150
4	584	315	269
6	584	241	343
8	585	206	379
10	585	186	399

No sistema estudado é considerado um custo de R$ 400/m^2 para os colectores solares. A taxa de juro sobre o dinheiro emprestado é de 10% e as prestações para amortizar o valor do investimento têm valores fixos para os vários anos. Os valores das amortizações são referentes ao investimento inicial e incluem o valor da taxa de desconto.

O factor de que mais fortemente depende a amortização do investimento é a área de abertura do colector solar. Para as várias áreas de abertura do colector é apresentada a análise do investimento no gráfico da Figura 23:

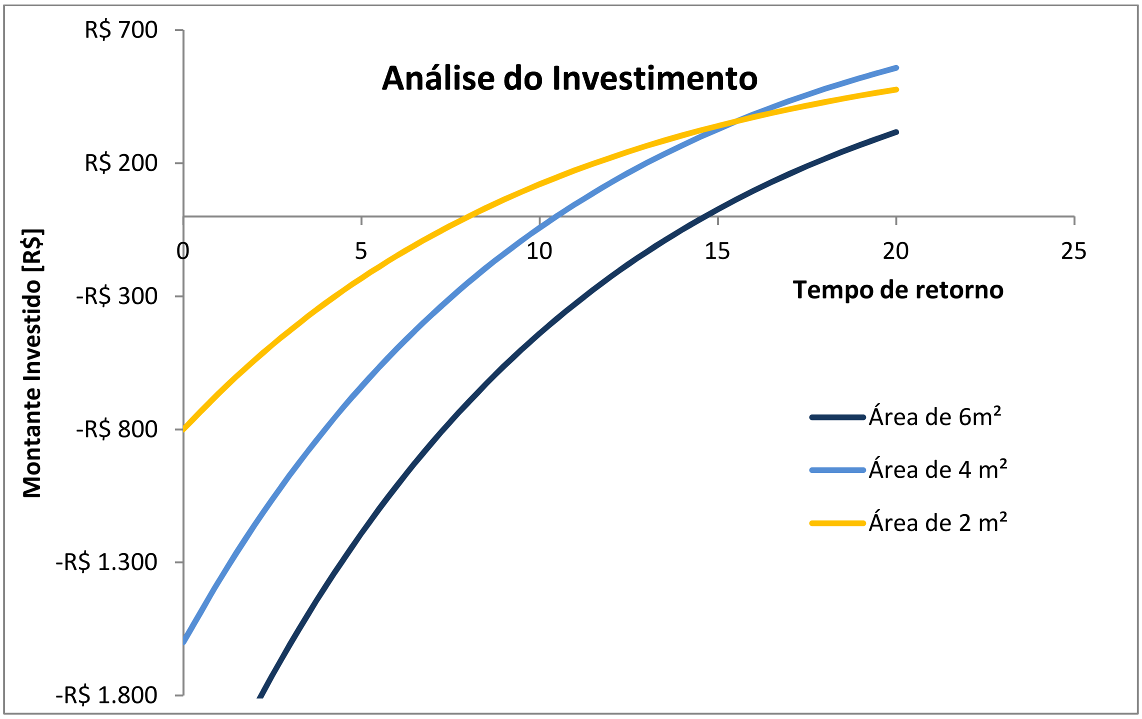


Figura 23 - Análise de investimento, calculando o tempo de retorno pelo método do VLA.

O período de retorno menor acontece para a situação de menor área de abertura de colector, pois o investimento inicial também é reduzido.

A análise do ciclo de custos e ganhos do sistema solar é feita na tabela seguinte. São comparados os valores do ciclo de custo para as situações em que é utilizada a energia solar e para quando é apenas utilizada a energia eléctrica. Para cada valor de área resulta um valor dos ganhos provenientes da energia solar.

Tabela 13 – LCS Solar para várias áreas de colector

Área [m²]	LCC SOLAR	LCC NÃO SOLAR	LCS [R$]
2	R$ 4.578	R$ 5.276	R$ 699
4	R$ 4.419	R$ 5.267	R$ 848
6	R$ 4.660	R$ 5.275	R$ 616
8	R$ 5.228	R$ 5.276	R$ 49
10	R$ 5.931	R$ 5.276	-R$ 655

O valor do investimento em equipamento foi o mesmo para todas as áreas de abertura do colector solar em 20 anos de análise do investimento. O *LCC* não solar

tem valores bastante semelhantes, pois só depende do fornecimento de energia eléctrica. Enquanto o *LCC* solar diminui de valor pois com o aumento da fracção solar, dependente da área do colector, diminuem os custos da energia eléctrica.

Entre os valores de 8 m^2 e 10 m^2 o sinal do valor *LCS* torna-se negativo e o aumento de área deixa de ser justificado. Para um valor da área de 4 m^2 existe um valor máximo como se pode ver na Figura 24:

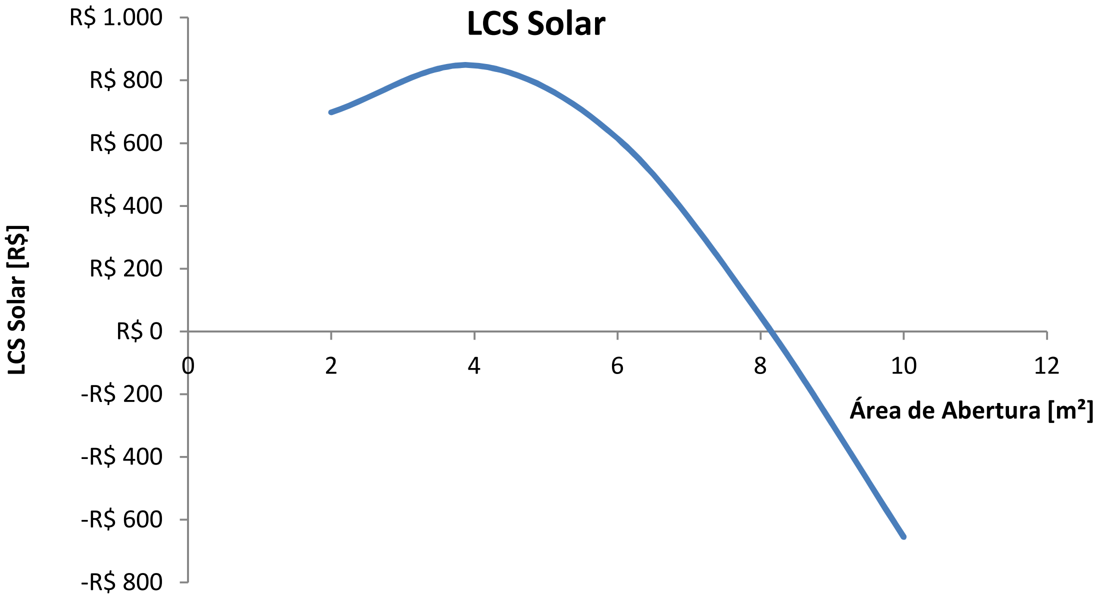


Figura 24 - – Gráfico do LCS Solar dependente da Área de abertura.

A curva começa no valor de 2 m^2 de área subindo o valor do *LCS* até ao valor de 4 m^2 de onde a função dos ganhos da aplicação do sistema solar começam ser menores.

O colector testado, para ser um investimento com retorno tem de ter uma área não superior a 6 m^2. A telha da casa de baixa de renda, onde é instalado o colector solar permite uma grande área instalada. Para um período de actividade de pelo menos 20 anos o sistema torna-se vantajoso para valores de área até 6 m^2

6. CONCLUSÕES

O objectivo do estágio era testar um protótipo de um colector solar plano e fazer uma análise económica do mesmo pelo método LCS. O estudo da eficiência do colector e o estudo económico revelaram, que para que o colector seja um bom investimento terá de ter uma área de abertura inferior a 6 m^2.

Na comparação entre os dois colectores solares testados pode concluir-se que o protótipo é de baixa qualidade, no entanto é um colector de baixo custo e de design simplificado, cujo objectivo é diminuir os custos com a energia. É apenas uma proposta inicial que merece atenção por parte do fabricante, para melhorar o projecto da casa onde o colector deve ser incluído.

A necessidade de aumentar a área de absorção do colector foi identificada quando o parâmetro $F_R(\tau\alpha_p)$ aumentou de valor em uma décima, ao utilizar a área das placas absorvedoras no lugar da área de abertura do colector. Como foi mencionado nos comentários à performance térmica do colector, existem pontos de contacto entre a telha metálica quente e o vidro, colocado por cima da telha. Esses pontos de contacto fazem aquecer o vidro e tornam-no mais opaco ao ser atravessado pela radiação solar, resultando num menor aproveitamento da energia solar. Mas a parcela mais importante no cálculo da eficiência para colectores de eficiência média continua a ser a área de absorção da radiação solar. Dessa forma também foi confirmado no cálculo da fracção solar feito na modelação transiente, que quando se variou (aumentou) a área de colector, a fracção solar correspondeu em variação (aumento) também.

As melhorias do colector podem se localizar na capacidade de absorção aumentando o η_0, ou na melhoria do isolamento, diminuindo as perdas térmicas ao minimizar os coeficientes k_1 e k_2. No entanto como foi demonstrado na apresentação de resultados, o facto de o colector ser a parte integrante de uma telha faz com que ele perca área de absorção. O cálculo efectuado para a área do absorvedor mostrou que o perfil da telha ocupa espaço que poderia ser usado para captar mais energia solar. Mas como a área disponível da telha da casa é elevada, a aplicação de tubos e placas absorvedoras é facilitada.

A análise económica revelou que a área de colector solar não pode exceder os 6 m^2. Este fato é determinante na escolha do colector a instalar, pois não é tão atractivo instalar 5 m^2 como será em simplicidade instalar 2 m^2 de colector solar. A impressão com que fico do colector integrado na telha é que é um projecto em vias de ganhar mais eficiência energética, uma vez que está bem enquadrado no problema que pretende resolver, apenas falta fazer um bom projecto do colector, sendo verificado por um outro protótipo de fabricação controlada e de qualidade.

A introdução do teste de um outro colector solar para termo de comparação surgiu na fase inicial dos testes, em que como este estava na bancada de ensaios, pronto a ser ensaiado, serviu de base de estudo para a familiarização com a bancada. Ao mesmo tempo eram registados valores para comparar com o colector protótipo que ainda não tinha sido entregue no LabSolar.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/CB-55 – Projecto 55:003.01-003/2, **Sistemas solares térmicos e seus componentes – Coletores solares Parte 2: Métodos de Ensaio,** Março 2009

ASHARE 93-86 **Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar collectors**, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, U.S.A. 1978.

COLLE, S. ; PEREIRA, E. B. **Atlas de Irradiação Solar do Brasil**. Instituto Nacional de Meteorologia INMET, 1998.

COLLE, S.; STARKE, A.; PASSOS, L.; VEIGA, C. **Uma Análise de Sistemas de Aquecimento Solar de Água para uso Doméstico no Brasil**, LEPTEN – Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia / LABSOLAR Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Setembro de 2010.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 3ª . ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006.

DIN V4757-4: 1995-11, **Solar Heating Systems: Solar Collectors; Determination of Efficiency, Heat Capacity And Pressure Drop.**

EES, **Engineering Equation Solver**, 2009. F-Chart software, University of Wisconsin – Madison, USA.

FISCHER S., HEIDEMANN W., MÜLLER-STEINHAGEN S., PERERS B., BERGQUIST P., HELLSTRÖM B. **Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2**, J. Int. Solar Energy Soc. v. 76, 2004.

GONÇALVES, G. **Bancada_Teste_Coletores**, 2008. Labview Version 8.5.

INCROPERA F. P. AND D. P. DE WITT **Fundamentals of Heat and Mass Transfer** John Wiley, New York, 1992

IQBAL, M., **An Introduction to Solar Radiation**, Academic Press, Toronto, 1983.

KRATZENBERG M.G., BEYER H., COLLE S. ALBERTAZZI A.G., GÜTHS S., FERNANDES D. 1, OIKAWA P.M.V., MACHADO R.H., PETZOLDT D. **Analysis of the collector test procedures for steady-state and quasi-dynamic test conditions in view of the collector coefficients uncertainties and model stability**, Solar World Congress Orlando, Florida, ISES International Solar Energy Society, 2005. 13 p.

KRATZENBERG, M. G., 2005. **Método para Avaliação de Incertezas de Ensaios de Colectores Solares Baseados nas Normas EN12975 e ISO9806**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.

KRATZENBERG M.G., BEYER H.G., COLLE S. AND PETZOLDT D. **Uncertainty calculation applied to different regression methods in the quasi-dynamic collector test**, EuroSun2004, The 5th ISES Europe Solar Conference, Freiburg, Germany, 2004.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART, R. (1990). **"Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance."** Solar Energy, 44(5), pp. 271-289.

SABATELLI V., MARANO D., BRACCIO G. AND SHARMA V.K. **Efficiency test of solar collectors: uncertainty in the estimation of regression parameters and sensitivity analyses**, J. Int. Energy Conversion Management, J.C. Denton, Belton, Texas, U.S.A, v. 42. 2002. p. 2287-2295.

SWERA. Solar and Wind Energy Resource Assessment. 2001. Disponível em: <http://swera.unep.net/>.

TRNSYS, The Transient Energy System Simulation Tool, 2006. Version 16.01.003, Solar Energy Laboratory,
University of Wisconsin – Madison.

ANEXO 1

LEPTEN
LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DE PROCESSOS
DE CONVERSÃO E TECNOLOGIA DE ENERGIA

UFSC/EMC – CAMPUS UNIVERSITÁRIO, TRINDADE FLORIANÓPOLIS, SC 88040-900, BRASIL
TEL: (048) 3234-0408 / 3234-2161 FAX: (048) 3331-7615 E-MAIL: colle@emc.ufsc.br

PLANO DE TRABALHO

Simulação e validação de um coletor solar de placa plana para edificações de baixo custo

Luís Pedro Gomes – Estagiário visitante da Universidade de Coimbra

Orientador: Prof. Sergio Colle

O trabalho de estágio consiste em realizar uma memória de cálculo e teste de bancada, de um coletor solar plano, de tubo e placa de cobre, cuja cobertura é integrada a uma telha de cobertura de casa popular, construída em chapa galvanizada e tratada e termicamente isolada com espuma de poliuretano. O trabalho é organizado segundo as seguintes metas:

1. Revisão da literatura técnica pertinente, respectiva ao projeto de coletores solares térmicos e teste de coletores em bancada de teste quase-dinâmico.
2. Montagem do coletor-protótipo e instrumentação, em bancada de teste quase-dinâmico do laboratório.
3. Cálculo da transmitância e das perdas térmicas de topo e de bordo, supondo-se absortância da placa absorvedora já conhecida e modelação.
4. Testes quase-dinâmicos, segundo norma européia corrente.
5. Análise dos resultados e comparação da eficiência medida com a eficiência teórica resultante de modelação.
6. Inserção das equações do coletor no software TRNSYS, já consolidado pelo mestrando Luigi Antônio de Araújo Passos.

7. Análise dos resultados da simulação e cálculo do tempo de retorno do investimento pelo método LCS.
8. Relatório técnico final.

Florianópolis, 27 de abril de 2011.

Prof. Sergio Colle
Orientador

ANEXO 2

Fischer

Fischer

IRMÃOS FISCHER S.A IND E COM



Rod. Antônio Heil, Km 23- Limoeiro Cx Postal 255 e 87
88352-502 – Brusque SC – Brasil
Tel: (47) 3251-2000 – Fax: (47)3350-1080
SAC: 0800-47 3535 – 0800 7293535 – sac@fischer.com.br
www.fischer.com.br - fischer@fischer.com.br
CNPJ: 82.984.287/0001-04
Insc. Estadual:250.176.475

Área Total: 39,41 m²
Dormitório 1: 8,58 m²
Dormitório 2: 10 m²
Sala/Cozinha: 16,08 m²
Banheiro: 2,68 m²



O Produto: Casa Modular Fischer

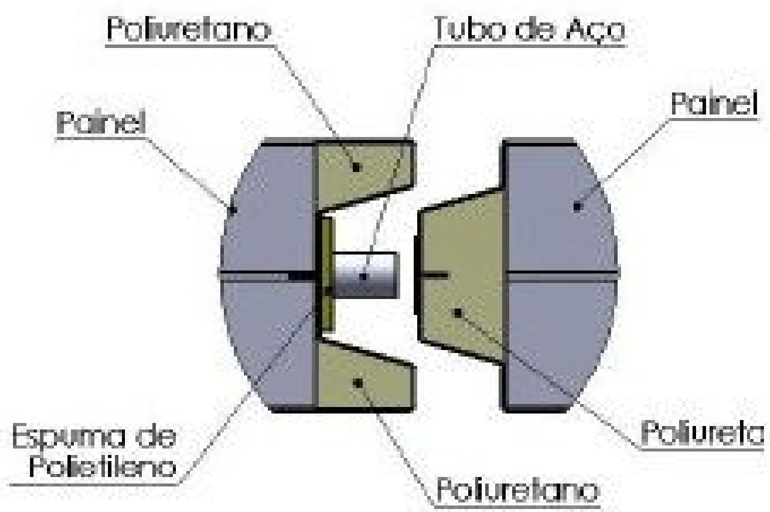


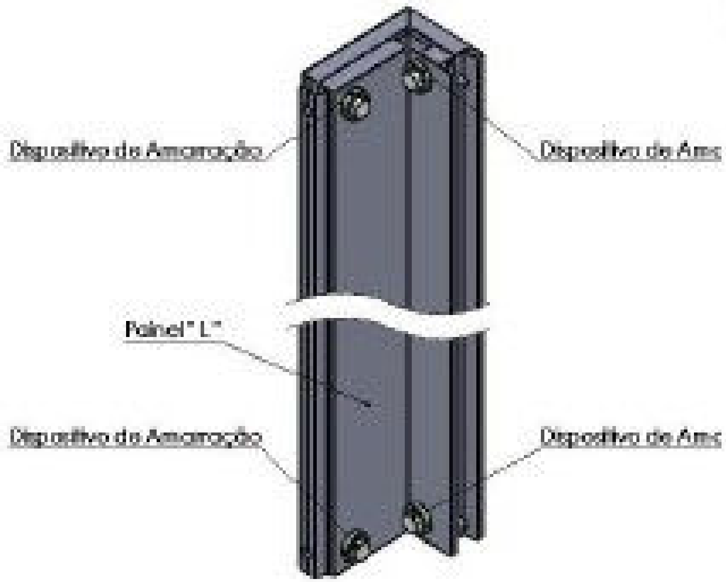
No mercado existem diferentes sistemas construtivos de moradias. A Irmãos Fischer desenvolve um sistema inovador que reúne o que há de melhor em cada um deles e surpreende com seus diferenciais.

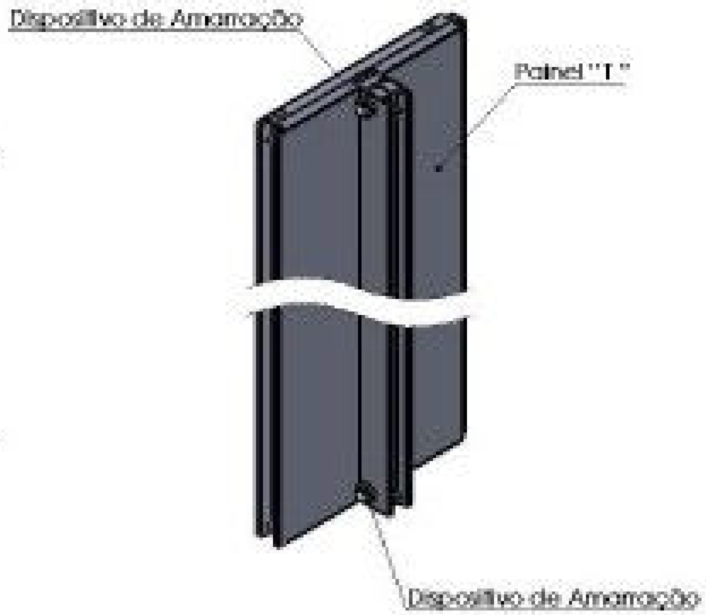
Ligação entre Painéis

Os painéis apresentam um sistema de perfil de encaixe do tipo macho/fêmea, na qual cada painel terá uma extremidade lateral fêmea e outra macho.

Além disso, em cada painel existe a passagem de um tubo de aço, tanto na parte inferior como na parte superior do painel, para passagem de um cabo de aço, realizando a amarração das paredes







Este sistema de amarração das paredes é efetuado pelos dispositivos de amarração localizados nas extremidades dos painéis de módulos "L" e "T", tracionado pelo cabo de aço passante dentro dos tubos de aço embutidos em cada painel.

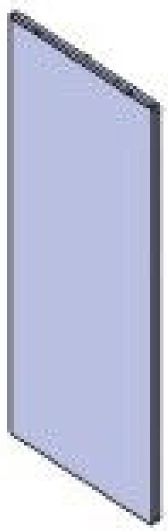
Tipos de Painéis

As paredes internas e externas das casas são formadas pelos painéis sanduíches (aço galvalume + Poliuretano (P.U.) + aço galvalume) desempenhando papel estrutural da construção.

Existem três tipos básicos de painéis:

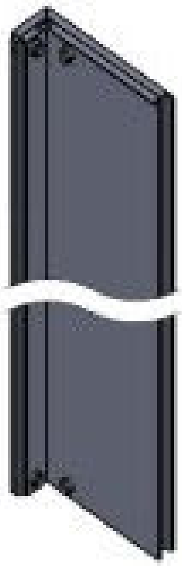
Módulo Liso

Painel A - (1,1 x 2,45 x 0,06) metros
Painel B - (1,0 x 2,45 x 0,06) metros
Painel C - (0,8 x 2,45 x 0,06) metros
Painel D - (0,5 x 2,45 x 0,06) metros
Painel E - (0,3 x 2,45 x 0,06) metros



Módulo "L"

Lado menor - 0,14m
Lado maior - 0,50m
Altura - 2,45m
Espessura - 0,06m



Módulo "T"

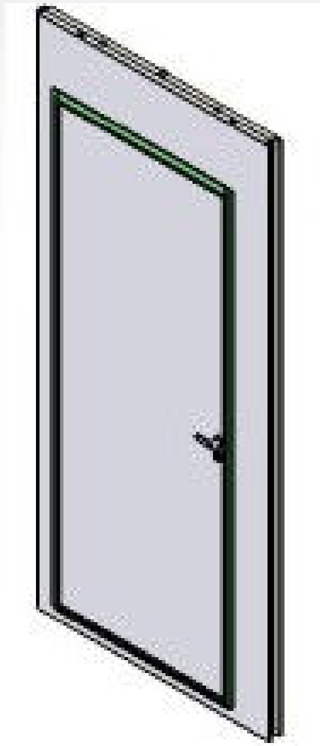
Aba central - 0,08m
Lado externo - 0,50m
Altura - 2,45m
Espessura - 0,06m

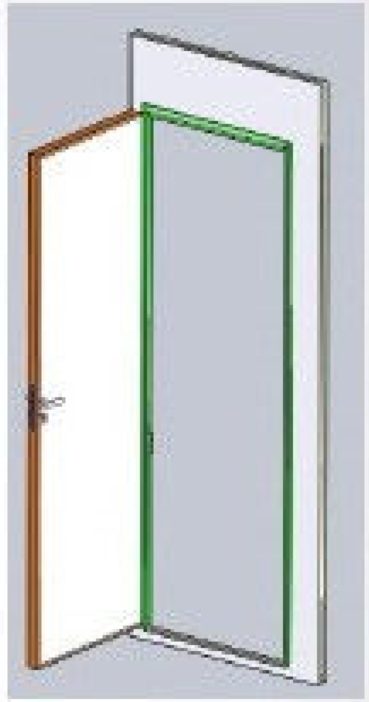


Fischer

Portas

As portas são trabalhadas no próprio painel, ou seja, é constituída do mesmo sistema construtivo, com perfis de acabamento e demais elementos (fechadura, dobradiças,...)





Janelas

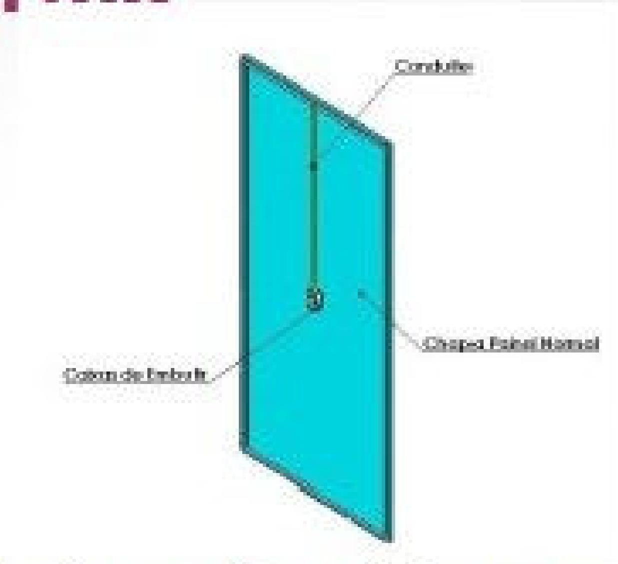
Janelas em alumínio, de correr, com duas folhas





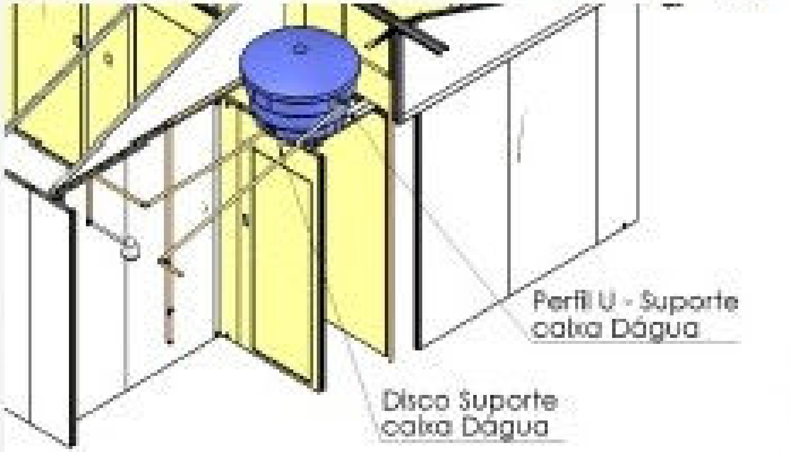
Instalação Elétrica

A instalação elétrica é através de eletrodutos (conduídes) embutidos no próprio painel durante o processo de fabricação dos mesmos. Assim também para as caixas elétricas.



Instalação Hidráulica

As instalações hidráulicas são externas, de PVC soldável, para água fria, com perfil de acabamento no painel, permitindo fácil manutencão.

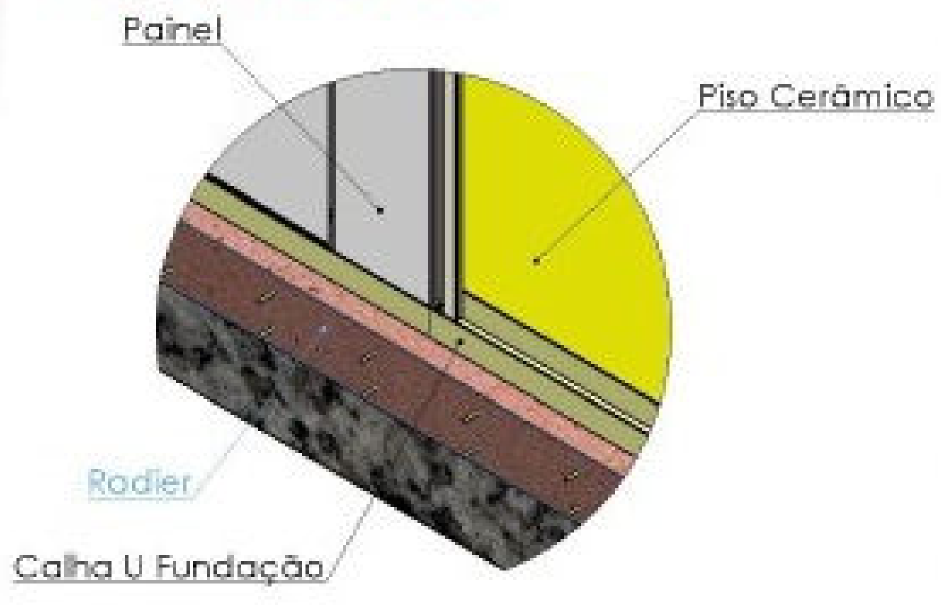




Esgoto e água pluvial obedecerão às especificações e normas da ABNT referentes, e nas quantidades especificadas em projeto.

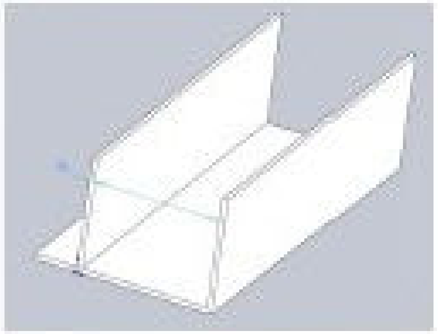
Fischer

Fixação na fundação

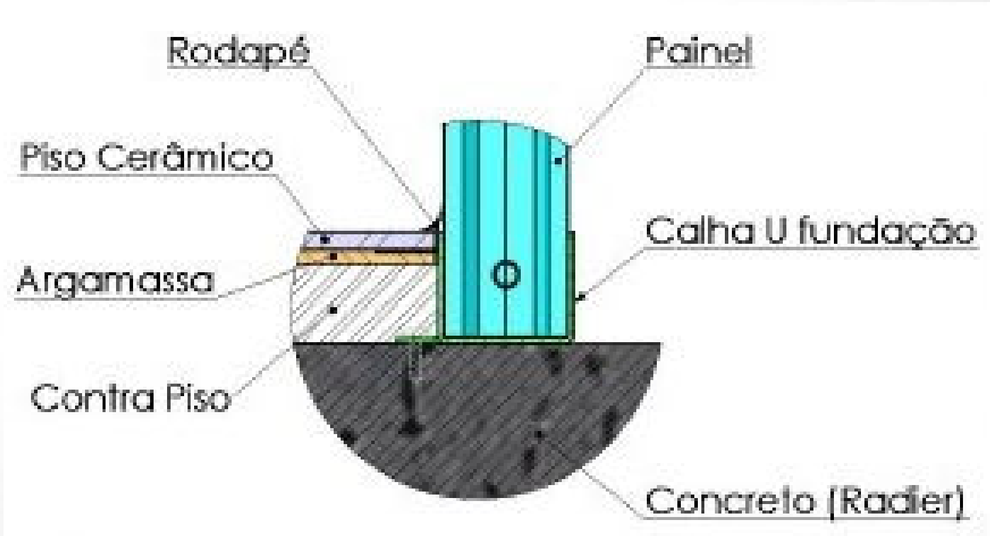


Para fixação dos painéis na fundação, é utilizado uma calha em formato "U" de PVC extrusado, com dimensão específica, onde são posicionados e fixados os painéis.

Esta calha possui uma espécie de "aba" para fixação da mesma no concreto (fundação) através de parafusos específicos.



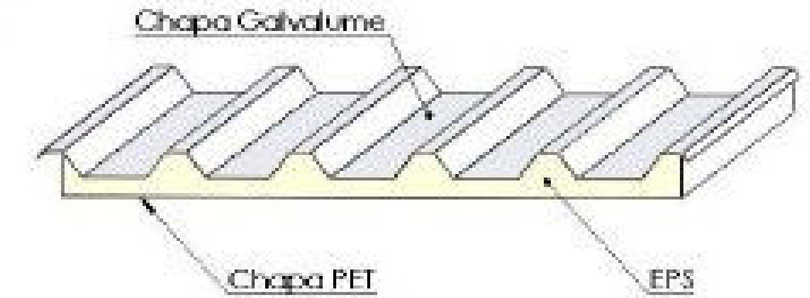
Calha "U" de PVC



Obs.: aplicação de fixadores para ancoragem do painel na calha.

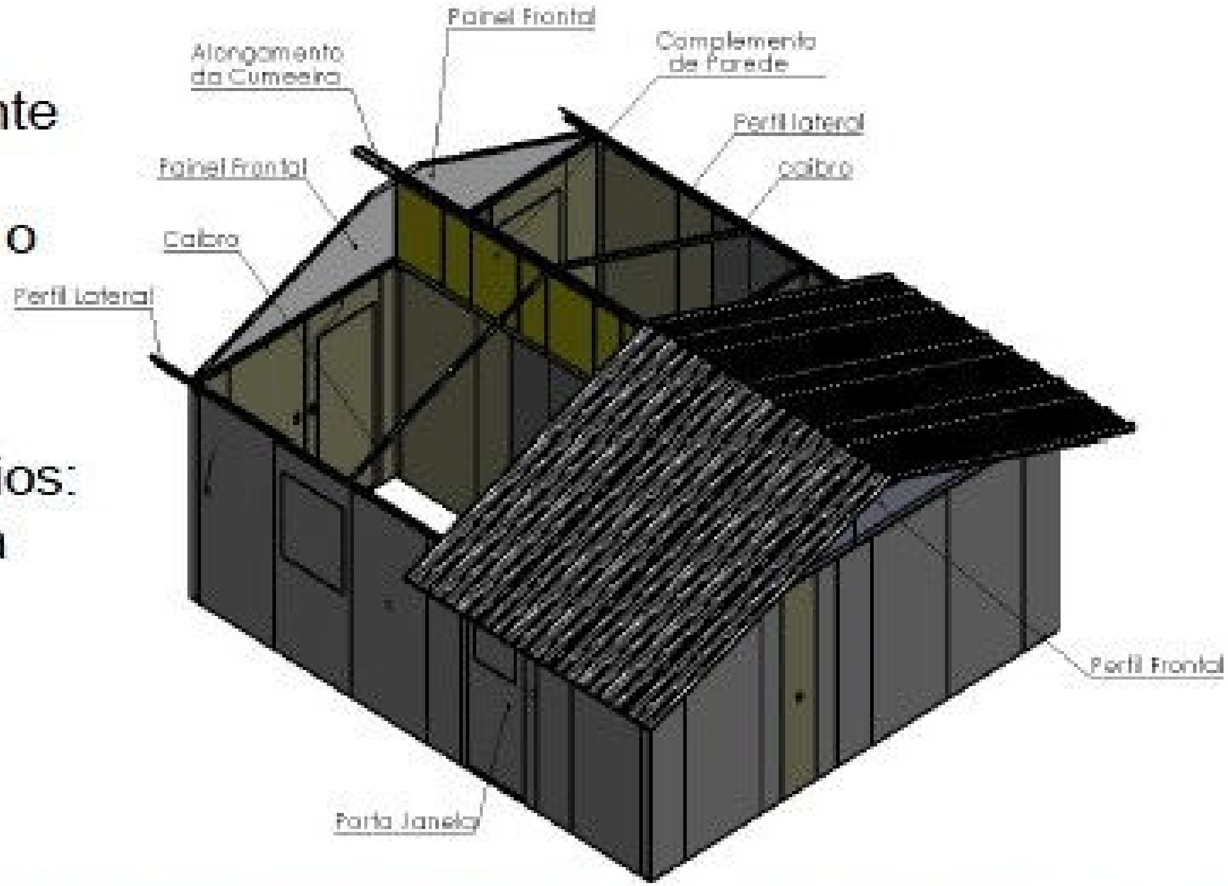
Cobertura

O telhado é executado em telha termo-acústica, do tipo sanduíche (Chapa aço galvalume + EPS + Chapa galvalume), auto-portante, dando o próprio acabamento de forro.



Obs.: O banheiro é o único ambiente da casa em que há aplicação de forro PVC. Nos demais ambientes o forro é junto à própria telha sanduíche.

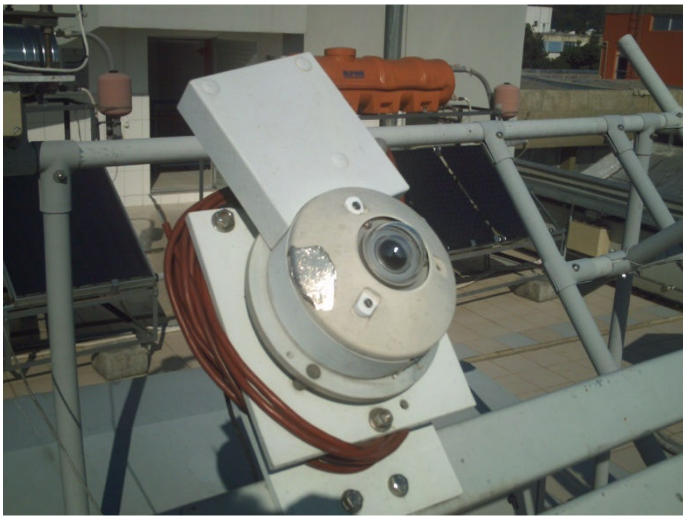
As telhas são fixadas em dois apoios: um nas paredes laterais e outro na parede central da casa.



ANEXO 3

O Sistema de aquisição de dados, ou bancada tem dois piranómetros do fabricante Kipp&Zonen. Um que efectua as medições da radiação global (G), e outro acoplado com um anel sombreador utilizado para medir a radiação difusa (G_d). Dessa forma a radiação directa (G_b) é calculada indirectamente através da expressão:

$$G = G_b + G_d$$



Piranómetro medidor da radiação global.



Piranómetro com anel sombreador para a medição da radiação difusa

A temperatura do fluido é medida por termo-resistências de platina do tipo Pt100, sendo colocadas na tubulação à entrada, e à saída do colector depois dos dispositivos de mistura. Os transdutores não devem ser afectados pela presença de ar,

sendo instalados no sistema com o elemento sensor apontado na direcção contrária ao fluxo de água na tubulação.

A temperatura ambiente é medida por um transdutor que terá de ser protegido com uma cobertura de cor branca e de preferência, ventilada (forçadamente) para reduzir o aquecimento pela radiação solar.

O Sistema da bancada tem integrado um Chiller York® funcionando como trocador de calor, para manter a temperatura de entrada de fluido no colector constante, e dois aquecedores de passagem eléctricos que controlam o valor da temperatura da água a dar entrada no colector.



Chiller York®.

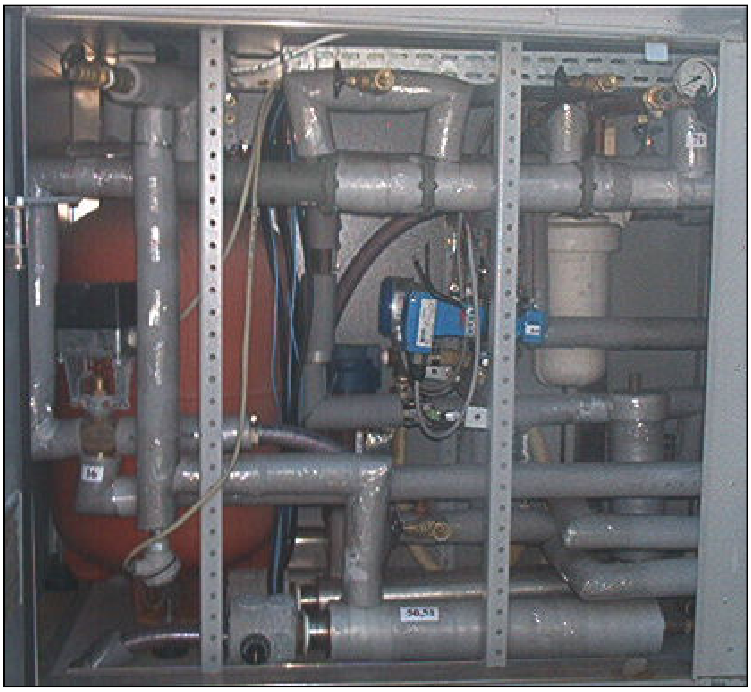


Anemómetro de Copo.

O vento é simulado pela operação de um ventilador radial apontando para a superfície do colector, que possui um anemómetro de copo instalado no topo, registando a

velocidade do vento. Os dados registados são assim mais precisos devido à localização do transdutor e colector no mesmo plano.

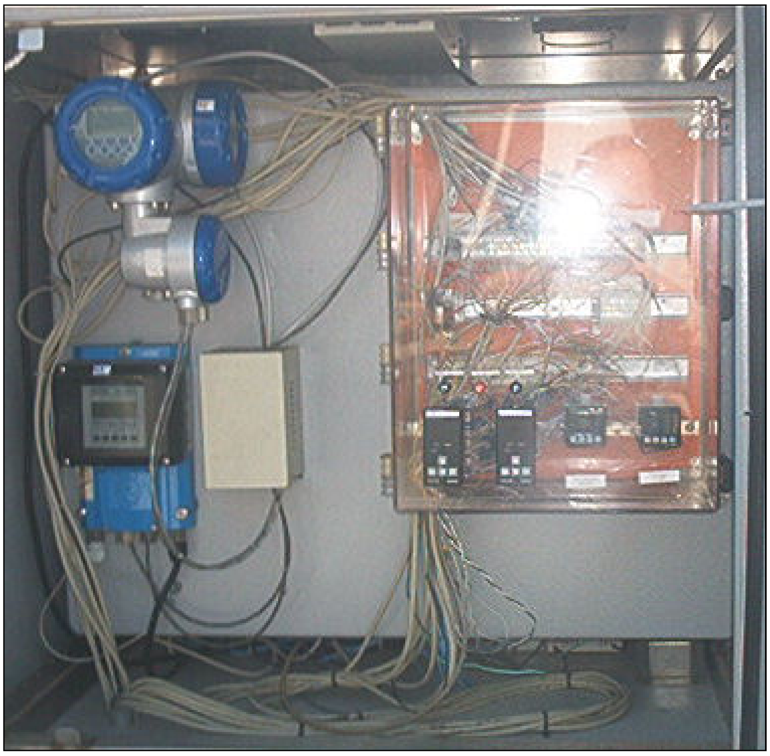
A vazão volumétrica de fluido circulando é controlada por um transdutor de indução marca Krohne-Cohnaut, de modelo IFC-020.



Vaso de Expansão de cor vermelha, aquecedores de passagem na parte inferior da imagem e medidor da vazão ao centro com cor azul.



Parte do sistema hidráulico com ambas as bombas fazendo a água do sistema circular. Em baixo à direita está um termo-resistor.



Elemento de controlo do Rack à direita e mostradores dos valores da vazão à esquerda.

Através dos elementos de controlo é possível regular a temperatura dos aquecedores de passagem. No caso das medidas dos valores de caudal, estas podem ser consultadas no elemento de controlo do Rack, mas a sua variação terá de ser feita com as válvulas manuais do sistema hidráulico. Quando é alterado o valor do aquecimento artificial terá de haver um reajuste do caudal, para que este se mantenha entre os valores admissíveis pela norma.

Na norma é especificado o limite da presença de obstáculos, que em frente ao colector não deverão ter ângulos inferiores a 15°, evitando a obstrução de céu visível, no hemisfério do piranómetro. É recomendada a instalação de um ventilador (coberto por uma chapa de cor branca) quando a velocidade média do vento é inferior a 3 m/s.

Os piranómetros devem ser instalados do lado do colector, com a mesma inclinação e azimute.

Segundo a Norma as tubagens devem ser isoladas termicamente de forma a controlar as perdas térmicas do fluido para o exterior.